

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN
DE LA ARQUITECTURA DEL PORTAFOLIO DE PRODUCTOS
PARA EMPRESAS DEL SECTOR METALMECÁNICO**

Ing. ROSEMBERG CAICEDO ORTEGA

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA
2008**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN
DE LA ARQUITECTURA DEL PORTAFOLIO DE PRODUCTOS
PARA EMPRESAS DEL SECTOR METALMECÁNICO**

**Presentado por:
Ing. ROSEMBERG CAICEDO ORTEGA**

**Director:
Ing. HERIBERTO MAURY RAMÍREZ, Ph. D.**

**Proyecto de investigación presentado como requisito para optar por el título
de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA
2008**

Este documento contiene información confidencial propiedad intelectual del Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Diseño de la Universidad del Norte; se entrega a quien interese con el entendimiento de que lo utilizará exclusivamente en la revisión y evaluación de su contenido y que lo mantendrá en forma confidencial, guardándolo contra inspección de terceras personas no autorizadas explícitamente por UniNorte.

V°B° Director de proyecto.
Ing. HERIBERTO MAURY RAMÍREZ, Ph. D.
Dpto. de Ingeniería Mecánica – Universidad del Norte.
Barranquilla, 2008.

*"The important thing is not to stop questioning.
Curiosity has its own reason for existing.
One cannot help but be in awe when one contemplates the mysteries of eternity,
of life, of the marvelous structure of reality.
It is enough if one tries merely to comprehend a little of this mystery every day.
Never lose a holy curiosity."*
Albert Einstein

Para ser feliz, comienza a entender y practicar el amor incondicional y la libertad.
Comienza a disfrutar viendo como los demás crecen a medida que eligen crecer,
no a medida que tú eliges que ellos crezcan. Comienza a disfrutar del momento
desconocido del futuro y deja de aferrarte al pasado momento conocido.
Empieza a crear en lugar de reaccionar.
Anónimo

Agradecimientos.

Una vez más la vida me permite escribir esta hoja- podría ser un libro completo-, e intentar plasmar el sentimiento hacia todas esas personas que aparecen en el camino y nos brindan su apoyo, conocimiento, y oportunidades entre otras. Una de esas, fue el cursar la maestría en ingeniería mecánica en la Universidad del Norte y vivir cuatro años de experiencias increíbles y fantásticas.

Un especial agradecimiento al Ingeniero Heriberto Maury, ser humano excepcional, quien muchas veces depositó su confianza en mis capacidades, dándome innumerables oportunidades de expandir mis conocimientos y habilidades.

Al cuerpo de profesores del departamento de ingeniería mecánica, a los ingenieros Marco Sanjuan, Antonio Bula, José Wilches, Lesme Corredor, muchas gracias por facilitar y hacer la experiencia más agradable.

A Mario Esmeral, parte fundamental de este logro, a todas las aventuras laborales, en medio de la nada, pero en pos de la ingeniería. A Lucho, el partner ideal, y amigo, gracias por no dejar desfallecer el anhelo de aprender todos los días algo nuevo.

Al grupo de trabajo del "hueco", a Carlos compañero en las verdes y maduras, a Bleidys excelente compañera y amiga, a Luis Daniel, Mario Jesús, a Willmer Escorcia, gracias por todo. Al Coro de la Universidad del Norte gracias por los momentos de risa y la emoción de la única presentación en el Amira de la Rosa.

A Vanessa, mi novia, por los momentos compartidos y por el deseo del crecimiento día a día.

A mi hermosa familia, a mi Madre Nila Rosa, la mujer que más admiro en este mundo, fuerte, amorosa y sensible como solo ella sabe, a Paola quien juega un papel especial en el proceso, madre de una criatura de Dios en la tierra, Sasha Andrea, a esa sonrisa contagiosa con el te quiero más puro y alegre que he conocido. A mi hermano Nelson quien nos ha traído siempre un nuevo camino a recorrer para llegar a la meta, allá arriba en la montaña. A mi padre, quien me recuerda que todo se puede solucionar y sanar.

A todos los que no alcanzo a mencionar pero han estado ahí en el momento preciso con la palabra adecuada, mil gracias y el silencio como señal de respeto y agradecimiento eterno...

Comentado [PSU1]: criatura

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. DEFINICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
2.1. OBJETIVO GENERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2.3. JUSTIFICACIÓN	15
2.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	16
2.5. ESTADO DEL ARTE	17
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	19
2.2 PRINCIPIOS DE ARQUITECTURA	21
2.3 CONCEPTO DE PLATAFORMA.....	23
2.3.1 Tipos De Plataformas.....	24
2.4 PORTAFOLIOS DE PRODUCTOS Y TIPOS:	25
2.5 CONSIDERACIONES PARA LA OBTENCIÓN DE PLATAFORMAS.	26
2.6 METODOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE PLATAFORMAS	28
2.6.1 Escalamiento de productos.	28
2.6.2 Método de la teoría constructiva de plataforma de productos.	29
2.7 CONSIDERACIONES SOBRE SILOS Y SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.	32
2.7.1 Ecuaciones para el diseño de silos.	33
2.8 TIPOS DE COMPORTAMIENTO DE DEMANDA DE MERCADO.....	35
3. METODOLOGÍA DESARROLLADA.....	37
3.1 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA AL DISEÑO DE SILOS.	38
3.1.1 Análisis de las Restricciones de Diseño y Técnicas.	39
3.1.2 Definición de tipos de arquitectura aplicable e identificación de los MMV para la personalización.....	39
3.1.3 Parametrización del diseño y generación de productos factibles.....	40
3.1.4 Evaluación económica de los productos incluyendo el escenario de demanda.	42

3.1.5 Selección de los niveles de las variables de diseño a ofertar y creación del portafolio de productos.....	44
3.2 PLANTEAMIENTO DEL MÉTODO DE VALUACIÓN IAMS PARA SILOS METÁLICOS.	46
3.3 INDICADORES PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
5. CONCLUSIONES	55
6. RECOMENDACIONES	57
7. TRABAJOS FUTUROS.....	58
8. BIBLIOGRAFÍA	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relación de los conceptos desarrollados en el estado del arte.	18
Figura 2. Representación de un producto modular y su diseño integral	20
Figura 3. Representación de la interacción de conceptos en el desarrollo de productos..	20
Figura 4. Relación de los conceptos presentados y los métodos de solución empleados.	21
Figura 5. Concepto de Plataforma de producto y Familia de productos	23
Figura 6. Ejemplo de plataforma modular	24
Figura 7. Ejemplo de Plataforma escalable, camiones de carga	25
Figura 8. Tipos de Arquitectura de Portafolio	26
Figura 9. Estrategias de integración de plataformas de productos	28
Figura 10. Representación de la metodología de Hernández (2003) y su solución.	30
Figura 11. Metodología Propuesta por Williams et al.	31
Figura 12. Silos para almacenamiento de líquidos.....	32
Figura 13. Batería de silos.	33
Figura 14. Comportamiento de la presión y los esfuerzos en los silos de acuerdo al tipo de fluido almacenado.....	33
Figura 15. Modelación de comportamientos de demanda no-uniforme. a) discreta b) lineal c) distribución normal d) aleatoria.	36
Figura 16. Metodología Propuesta.....	38
Figura 17. Modularización del número de láminas por módulo	40
Figura 18. Modularización del número de módulos por silo	41
Figura 19. Algoritmo de la metodología aplicada a los silos.....	44
Figura 20. Algoritmo de la metodología de Williams aplicada a los silos.....	47
Figura 21. Gráfica de la Razón de Ganancias	52
Figura 22. Gráfica de la Ganancia del portafolio	53
Figura 23. Gráfica de la eficiencia del portafolio	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principios de arquitectura de productos [Miller y Elgaard, 1999]	22
Tabla 2. Resumen de valores en escenarios de demanda utilizados.	36
Tabla 3. Resumen de variables y límites en el diseño de los silos.	39
Tabla 4. Parámetros para la generación de los silos factibles de fabricación.....	42
Tabla 5. Resultados de cálculo de variabilidad para una corrida de datos.	45
Tabla 6. Particiones de las variables de diseño para el método de Williams.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Tabla 7. Comparación de características de los silos con mayor ganancia.....	50
Tabla 8. Resultados de la metodología propuesta según el escenario de demanda.	51
Tabla 9. Resultados de la metodología de Williams utilizando Δ Variables de entrada = 1	51
Tabla 10. Resultados de la metodología de Williams utilizando Δ Variables de entrada = tamaño de la lámina.	52

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Pesos específicos generalmente utilizados para el diseño de silos.....	62
Anexo 2. Capacidades y dimensiones de silos según Fabricante SCAFCO.	63
Anexo 3. Capacidades y dimensiones de silos según Fabricante DOHOGNE.....	64
Anexo 4. Gráfica de Escenario de Demanda Puntual	65
Anexo 5. Gráfica de Escenario de Demanda Lineal Positiva.	66
Anexo 6. Gráfica de Escenario de Demanda Aleatoria.	67
Anexo 7. Gráfica de Escenario de Demanda Lineal Negativa.	68
Anexo 8. Gráfica de Escenario de Demanda Gaussiana	69
Anexo 9. Código Fuente del Algoritmo en la metodología propuesta.	70
Anexo 10. Código Fuente del Algoritmo en la metodología de Williams.....	77

GLOSARIO

PRODUCTO: Es un conjunto interrelacionado de subsistemas y/o componentes ya sea físicos o intangibles, que satisfacen una necesidad u oportunidad del mercado.

MÓDULO: Bloque, conjunto o grupo de componentes de fácil adición y/o sustracción, con independencia funcional y estructural, que hacen posible que un producto cumpla una amplia variedad de funciones y/o sea fácilmente reconfigurado.

PRODUCTO MODULAR: Aquel orientado a una elevada flexibilidad funcional y/o constructiva gracias a su organización en bloques o subconjuntos de componentes de fácil adición y sustracción.

PRODUCTO INTEGRAL: Una arquitectura integral incluye un mapa complejo (uno a uno) de los elementos funcionales a los componentes físicos y/o interfaces acopladas totalmente, que le impiden su capacidad de re-configuración debido a que no existe autonomía funcional y estructural entre los mismos.

FAMILIA DE PRODUCTOS: Grupo de productos que comparten funciones, componentes y/o base tecnológica o recursos, los cuales pueden ser adaptados para satisfacer una variedad de requerimientos de clientes en nichos específicos de mercado, o para obtener ventaja competitiva en cualquiera de las fases de su desarrollo.

Comentado [HM2]: Aquí se modificó un poco este concepto

ARQUITECTURA DE PRODUCTO: Es la descripción en el nivel funcional de la composición, organización y de las interacciones entre los bloques funcionales de un producto con sus interfaces; en términos de sus requerimientos operativos, de servicio y constructivos durante su ciclo de vida, en los diversos modos de operación y formas de uso para las que se ha de concebir el producto.

PLATAFORMA DE PRODUCTOS: Los parámetros fijados (comunes), características, y/o componentes permanecen constantes de producto a producto dentro de una familia de productos dada.

PORTAFOLIO DE PRODUCTOS: Es la compilación de los productos fabricados por una empresa, dada una racionalización de uso de elementos, procesos y sistemas de información comunes.

GAMA DE PRODUCTOS: Es la agrupación de productos necesarios para una actividad, cuya arquitectura se concibe para resolver de forma óptima tanto su originación (diseño) como su destinación (uso).

VARIEDAD: Se refiere al grupo de modelos de productos que una empresa puede producir dentro de un periodo particular de tiempo en respuesta a la demanda de un mercado.

INTRODUCCIÓN

El interés por esta investigación surge como consecuencia de los nuevos retos que establece el desarrollo de producto en el actual mercado globalizado; uno de ellos, la necesidad de satisfacer a diferentes segmentos de mercado como una de las fórmulas para competir con otras empresas, ofreciendo mayor variedad en los productos con el menor impacto financiero para la organización.

El desarrollo de productos innovadores es el resultado de etapas de trabajo interdisciplinario, en los cuales el diseño conceptual y básico de dichos productos, exigen un esfuerzo mayor para ver sus resultados, o su sombra¹, en el resto del ciclo de vida del mismo. Obtener productos que satisfagan diferentes necesidades del mercado gracias a un mínimo de variaciones, demanda el desarrollo de metodologías que faciliten los procedimientos y guíen a los diseñadores en el proceso.

Es así como hacia finales de los 80's aparecen publicaciones sobre el tema de modularidad, un concepto que trae ventajas en los productos y en su manufactura, en la medida que se obtenga un equilibrio entre las expectativas del cliente y las fortalezas de la empresa. Igualmente se han desarrollado conceptos más amplios como el de familia de productos y portafolio de productos, este último se convierte en el tema de este proyecto, con el cual se propone una metodología de diseño para lo que puede ser una empresa metalmecánica del sector local.

Comentado [PSU3]: ¿????

El portafolio de productos de una empresa debe ser una síntesis orientada a un amplio espectro de las necesidades de sus clientes donde se optimicen los recursos de la empresa. En este caso particular, se obtiene un portafolio de productos para sistemas de almacenamiento metálicos, donde se obtiene una gran cobertura de las demandas con la mínima variedad de sistemas desarrollados, razón por la cual se propone aplicar métodos de escalamiento y parametrización para obtener la arquitectura del portafolio y finalmente, se valida la metodología desarrollada mediante un análisis comparativo de los beneficios obtenidos al aplicarla sobre un caso particular frente a los resultados obtenidos con la metodología propuesta por Christopher Williams et al²

¹ RIBA, Carles and MOLINA, Arturo. Ingeniería concurrente. Una metodología integradora. Barcelona: UPC, 2006. p.111.

² Christopher B. Williams et al. "Designing platforms for customizable products in markets with non-uniform demand" ASME 2004

1. DEFINICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y validar una metodología para obtener el portafolio de productos de empresas metalmecánicas, de forma que se ofrezca máxima variedad a menor costo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una exploración bibliográfica del estado del arte en cuanto a metodologías relacionadas con el desarrollo de arquitectura de portafolio de productos, con el fin de identificar tendencias y limitaciones.
- Sintetizar las pautas o lineamientos necesarios para la obtención de la familia de productos de equipos metalmecánicos.
- Desarrollar una herramienta informática que sintetice la metodología propuesta.
- Validar la propuesta de obtención del portafolio de productos analizando comparativamente los beneficios obtenidos en su aplicación frente a los logrados con otras metodologías.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los mercados cada vez más competitivos, exigentes en sus demandas de calidad y personalización, propician la aplicación de metodologías para el desarrollo de productos que se adapten a estas necesidades. El sector metalmecánico local³ resulta ser un espacio interesante donde aplicar estas técnicas, a fin de crear ventajas competitivas y diferenciadoras en los productos que ofrecen.

³ Ortiz Ayala, Carlos. en Tesis: "Modelado del ciclo de vida del producto del sector metalmecánico de Barranquilla, orientado a las empresas con potencial para la aplicación de la ingeniería concurrente". Uninorte 2001.

La pertinencia de este estudio radica en las ventajas que ha dado la aplicación de los principios de arquitecturas en productos de línea blanca tales como electrodomésticos, herramientas manuales y productos electrónicos de consumo masivo. Dichos productos han tomado las ventajas de la producción en masa y permiten ofrecerse como personalizados en masa⁴. Por lo tanto, al desarrollar metodologías para productos metalmecánicos, específicamente silos metálicos, se pretende aprovechar esas ventajas.

Por otra parte, en cursos de estudio superior es donde se interactúa con investigaciones que los planes de formación básica no abordan, por lo cual se convierte en una oportunidad a facilitar el conocimiento hacia entornos productivos donde se puedan implementar mejoras con los temas relacionados al desarrollo de productos.

Este trabajo está enmarcado dentro de la línea de investigación en ingeniería de diseño de máquinas y productos del GIMYP* de la Universidad del Norte, afianzando los conceptos de ingeniería concurrente y adaptándolos a las necesidades de las industrias locales.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

En este proyecto solo se analizará una línea de productos en particular dentro de los que ofrece una empresa característica del sector, y se creará el catálogo de productos. No se analizará la interacción con otros productos ofrecidos por la empresa, o la posibilidad de interactuar con otros ofrecidos por competidores.

En el ejercicio de los silos metálicos sólo se analizará el diseño del cuerpo del silo, sin tener presente la gama⁵ o elementos accesorios del mismo, como son las tolvas inferiores, válvulas de dosificación, cubiertas y sistemas de llenado. La incidencia de la similitud de estos elementos dentro del diseño del portafolio queda como parte de trabajos posteriores.

La marcada tendencia en las empresas locales hacia la producción de diseños a la medida y la escasa fabricación de productos tecnológicos de mediana tecnología y

⁴ Op cit Christopher B. Williams et al.

* Grupo de Investigación en Materiales Diseño y Procesos de la Universidad del Norte

⁵ RIBA, Carles and MOLINA, Arturo. Ingeniería concurrente. Una metodología integradora. Barcelona: UPC, 2006.

consumo masivo, dificulta el ejercicio de aplicar algunas de las metodologías existentes.

1.5 ESTADO DEL ARTE

La mayoría de estrategias para la obtención de familias y plataformas de productos han sido reportadas como desarrollos desde la academia, en algunos casos obedeciendo a formas de describir lo que se ocurre en el desarrollo de productos mecatrónicos y de línea blanca, una muestra es el trabajo desarrollado por Otto & Wood⁶, quienes describen los principios de arquitectura que utilizan ciertos productos de consumo masivo y las implicaciones de su escogencia.

Comentado [PSU4]: Este párrafo se debe re-escribir. No se entiende claramente lo que se desea expresar en él.

Por otra parte Simpson⁷ propuso un método denominado “Método de exploración del concepto de Plataforma de Producto” (PPCEM por sus siglas en inglés), con el cual se define una segmentación del mercado y se especifica una plataforma para una familia de productos escalable de manera vertical. Lo anterior con métodos de optimización multi-objetivos basados en algoritmos genéticos.

Comentado [PSU5]: por sus siglas en Inglés

González-Zugasti et al⁸ propusieron una metodología para diseñar plataformas de productos y variaciones de estas, teniendo presente los requerimientos de desempeño técnico y los costos finales de la familia en consideración. Por otro lado el trabajo desarrollado por De Weck et al⁹ plantea una optimización a dos niveles, en la familia y en el producto, buscando incrementar la ganancia global.

Comentado [PSU6]: propusieron

Hasta este punto el objetivo de los trabajos mencionados se había centrado en optimizar el desempeño de una plataforma de manera que se lograran altos beneficios para la empresa, luego se enfocaron principalmente en encontrar un número óptimo de plataformas que permitiera abarcar segmentos de mercados más amplios y maximizar las similitudes en los componentes para obtener mayores beneficios.

⁶ OTTO, Kevin.; WOOD, Kristin. Product Design. Techniques in Reverse Engineering and New product Development, Prentice Hall, New Jersey, 2001, 620 p.

⁷ SIMPSON T. W. Product platform design and customization: Status and promise. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. 2004; 18 – p. 3-20.

⁸ Gonzalez-Zugasti, J. P., Otto, K. N. and Baker, J. D. A Method for Architecting Product Platforms. *Research in Engineering Design*. 2000; 12, 61-72.

⁹ DE WECK, Olivier L. and SUK SUHY, Eun. Product family strategy and platform design optimization. En: *ASME Design Engineering Technical Conferences*, Massachusetts Institute of Technology. (sep. 2003); p. 1-11.

Seepersad et al¹⁰ hicieron trabajos para la determinación del número de plataformas escalables y generacionales óptimas, solucionando problemas de soporte de decisión y utilizando métodos de optimización multi-variable. En el trabajo desarrollado por De Weck et al¹¹ se busca el número óptimo de plataformas usando sensibilidad del volumen de ventas en segmentos de mercado de acuerdo al desempeño de alguna variación del producto.

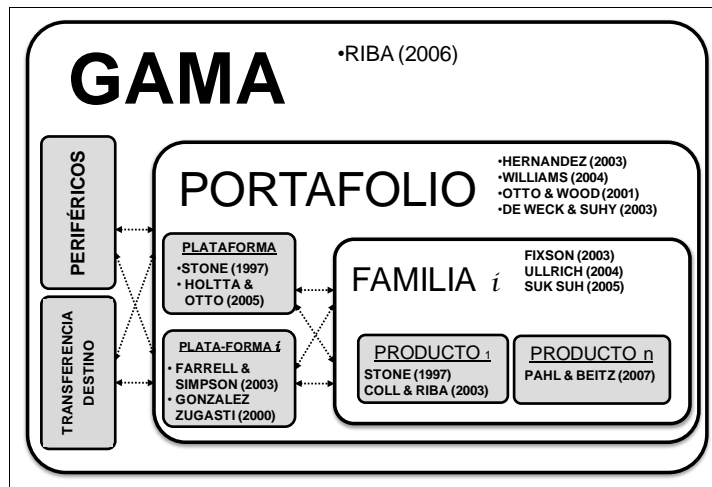
Comentado [PSU7]:

Comentado [PSU8]: se

A continuación se plantea una síntesis de los conceptos y los principales investigadores que han desarrollado trabajos sobre dichos temas. En la Figura 1 se muestra una asociación de autores revisados en la exploración bibliográfica y el área donde aplicaron su trabajo.

Es importante resaltar que los conceptos son incluyentes uno al otro hasta llegar a un nivel más complejo que abarca la relación de todos ellos con los elementos de transferencia y destino con que pueden interactuar (gama). Un concepto muy general es el de producto, este a su vez es complementado con el de familia de productos, así hasta llegar al concepto de gama.

Figura 1. Relación de los conceptos desarrollados en el estado del arte.



¹⁰ Seepersad, C.C., Hernandez, G., & Allen, J.K. A quantitative approach to determining product platform extent. *Proc. ASME Design Engineering Technology Conf.* 2000

¹¹ De Weck. Op. cit. p. 1-11.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Para el desarrollo de un producto se requiere del seguimiento de etapas lógicamente establecidas, donde se van definiendo cada vez en mayor detalle las características del mismo. El modelo básico para el desarrollo de un producto inicia con la identificación de una necesidad en un sector o mercado, seguido de una etapa de definición de las especificaciones a cumplir, el diseño conceptual de alternativas, el diseño básico de las alternativas que se seleccionen, el diseño de detalle del producto para su posterior prototipado y pruebas, su fabricación en serie, finalmente comercializarlo, retirarlo del mercado y hacer su disposición final.

Comentado [PSU9]: seguido

Comentado [PSU10]: un análisis funcional y una ...

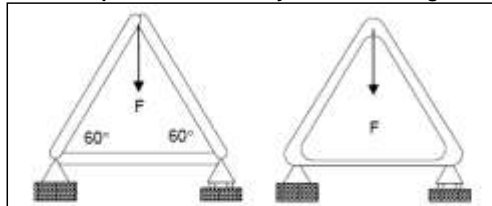
Todas estas etapas son iterativas en la medida que se necesiten modificaciones en su diseño, y deberían de tomarse las decisiones al interior de cada una de ellas de manera concurrente, es decir, que interactúen los responsables directos de cada área de trabajo y se minimicen o eliminen los impactos negativos por la toma de decisiones que vayan en contra de las capacidades de la empresa o de las necesidades reales del cliente.

Comentado [PSU11]: el análisis de la información así como la toma de decisiones al interior de cada una de las etapas del proceso debe hacerse

Para el diseño de un producto se puede decidir por una arquitectura modular o integral dependiendo de las ventajas que se quieran lograr, ya que hay características propias por el uso de una u otra, por ejemplo, en la Figura 2 se muestra el diseño de una estructura sencilla diseñada con un enfoque modular y su versión integral; si se diseña de manera modular se pueden simplificar los procesos de fabricación y ensamble por la similitud de sus elementos constitutivos, pero se corre el riesgo de sobre-diseñar elementos. En el caso de un diseño integral, se podrían optimizar las secciones del marco para que soporten los esfuerzos correspondientes, pero con las limitantes de fabricación específicas para el dispositivo.

Comentado [PSU12]: una arquitectura ...

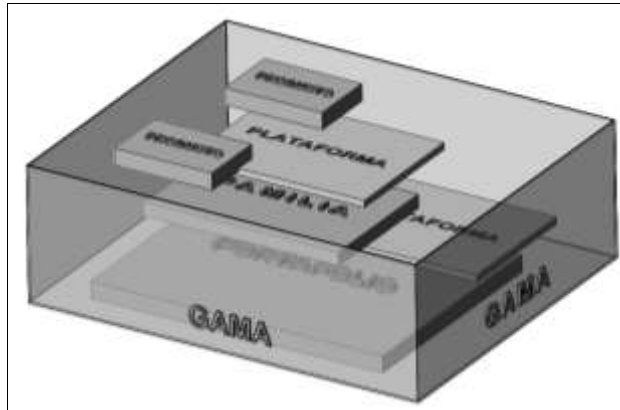
Figura 2. Representación de un producto modular y su diseño integral



Fuente: Tesis doctoral Katja Holtta 2005

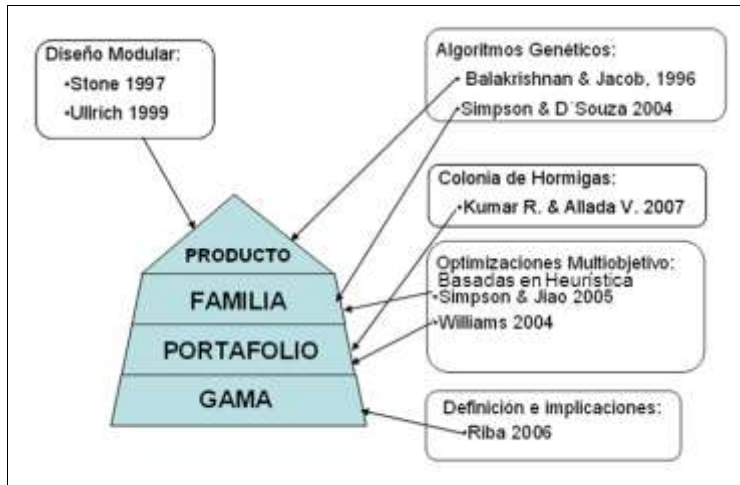
Dependiendo del nivel de complejidad del producto o de sus componentes, y de su interacción con otros productos o elementos dentro de la empresa, así será la forma de abordar su desarrollo. En la Figura 3 se muestra una interpretación de los conceptos que se han comentado y de cómo se soportan el uno al otro hasta llegar a un aspecto más amplio que los rodea: el concepto de gama.

Figura 3. Representación de la interacción de conceptos en el desarrollo de productos.



Para desarrollar u optimizar cada concepto de los mencionados, o su interacción con otros que definan el desarrollo de un producto, se pueden emplear diferentes enfoques o metodologías. La Figura 4 muestra un resumen de los métodos de solución utilizados por algunos autores de acuerdo al concepto o área donde han desarrollado sus trabajos.

Figura 4. Relación de los conceptos presentados y los métodos de solución empleados.



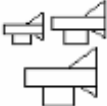
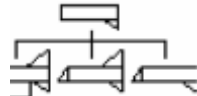
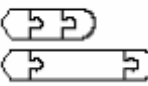




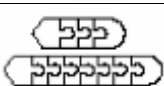


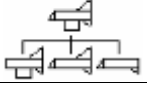
2.2 PRINCIPIOS DE ARQUITECTURA

De manera descriptiva se han definido varios principios de estructuración modular de productos y sistemas¹². Estos principios están agrupados en cuatro categorías a través de reglas de diseño y de cómo se articulan sus partes en módulos, interfases y plataformas.

Esta clasificación permite identificar la forma en que algunos productos están configurados y además ayuda al diseñador a asociarlas a posibles etapas donde aplicar esos principios de arquitectura. En la Tabla 1 se muestra el resumen de los principios según la etapa de diseño donde se aplica.

¹² ULLRICH, K, EPPINGER S. "Product Design and Development". 3 ed. Mc Graw Hill, New York. 2004. 366 p.

Tabla 1. Principios de arquitectura de productos [Miller y Elgaard, 1999]

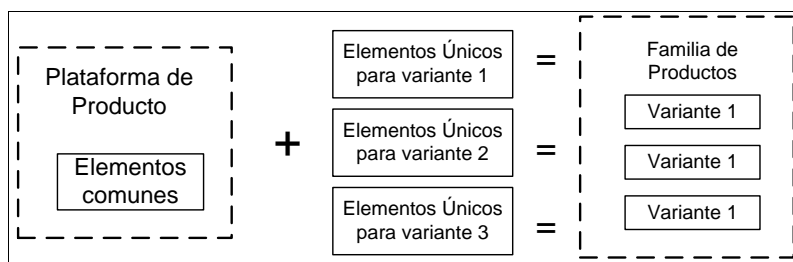
Etapa de aplicación de la arquitectura	Representación	Descripción
Personalización en el diseño		Escalonamiento: Conjunto de productos que difieren fundamentalmente en uno o más parámetros de carácter general (a menudo en el tamaño), pero que realizan la misma función, siguen el mismo diseño básico e implican procesos de fabricación similares. Ej.: Motores de distinta potencia.
		Estrechamiento: Segregación de un módulo con una funcionalidad común por varios productos que permite disminuir el número de componentes en una familia de productos y facilita el mantenimiento del módulo segregado. Ej.: Circuito de alimentación de potencia aplicado a más de un producto.
Personalización en la fabricación		Fabricación a medida: Estrategia de personalización que permite adaptar el producto a necesidades específicas modificando el valor de alguno de sus parámetros por medio de un proceso de fabricación irreversible. Ej.: Cables eléctricos de distintas longitudes.
Personalización en el montaje		Modularidad de componentes permutados: Dos o más módulos pueden ser ensamblados con el mismo módulo básico para crear distintas variantes de un producto de la misma familia. Ej.: varios motores distintos pueden equipar un mismo automóvil.
		Modularidad de componentes compartidos: Un mismo módulo puede formar parte de varios miembros de una familia o de varias familias de producto. Ej.: Un mismo motor puede equipar varios modelos de automóvil.
		Modularidad de bus: Un módulo básico o bus puede ser conectado simultáneamente a un determinado número de componentes iguales o distintos a través de un mismo tipo de interfase. Ej.: Bus informático donde se conectan distintos periféricos.
		Modularidad seccional: Arquitectura de producto que resulta de la combinación de forma arbitraria de uno o varios módulos conectados por el mismo tipo de interfases. Permite una gran variedad de soluciones constructivas. Ej.: Construcciones de Lego.
		Modularidad de apilamiento: Arquitectura de producto cuyo cuerpo está formado por el apilamiento de módulos iguales que se conectan mediante un mismo tipo de interfase. Ej.: Determinados sistemas de baterías.
Adaptación después de la producción		Ajuste: Estrategia de personalización consistente en posibilitar la adaptación de un producto a los requerimientos de uso mediante la modificación de uno o más de sus parámetros. Ej.: Regulación de un asiento de automóvil.
		Adaptación: Estrategia según la cual el producto se adapta automáticamente a la aplicación concreta sin la necesidad de una acción deliberada del usuario. Ej.: Cambio automático de automóvil.
		Extensión: Consiste en crear un producto o componentes que satisfagan al mismo tiempo una variedad de necesidades no contradictorias. Ej.: Sistema de alimentación eléctrica multi-tensión.

Fuente: COLL R. Judit, RIBA R. Carles. UPC 2003.

2.3 CONCEPTO DE PLATAFORMA

Una plataforma se define como un elemento físico o no físico que puede comprender aspectos funcionales aglomerados en ese elemento o sistema de información, a partir del cual se pueden derivar múltiples productos¹³, los cuales pueden denominarse como productos basados en plataforma. La Figura 5 muestra una representación del concepto de plataforma y cómo al colocar componentes que diferencien un producto de otro se habla de familia de productos.

Figura 5. Concepto de Plataforma de producto y Familia de productos



Fuente: SUK SUH, Eun. "Flexible Product Platforms" PhD Dissertation. Massachusetts Institute of Technology. 2005.

Para el desarrollo de un producto puede realizarse el diseño de una plataforma que pueda ser utilizada por otros productos e inclusive otras familias que finalmente conformen un portafolio donde se ofrezcan altas variedades de productos.

La decisión de desarrollar una plataforma obedece a un proceso complejo dentro de la empresa que pretende utilizarla. Según Simpson¹⁴, las plataformas tienen aplicación, cuando se dan las siguientes condiciones:

- Sistemas con elementos básicos comunes.
- Largo ciclo de vida.
- Sistemas altamente interconectados con la necesidad de crecimiento futuro.
- Productos en un entorno cambiante.
- Productos que incluyen tecnologías rápidamente cambiantes.
- Productos con arquitectura periférica personalizable.

¹³ HÖLTTÄ-OTTO, Katja. Modular product platform design. 2005, 65 p. Tesis Doctoral. Helsinki University of Technology, Laboratory of Machine Design.

¹⁴ SIMPSON, Timothy. Cursos de Diseño de productos. Disponible en Internet [25/02/2008] <http://www.mne.psu.edu/simpson/courses/me579/syllabus.html>

No son muy aplicables cuando se da lo siguiente:

- Productos de uso único o de ciclo corto que no necesiten accesorios para variación.
- Sistemas insensibles a cambios en el tiempo.
- Productos de función única.
- Mercados que cambian muy lentamente.
- Mercados de muy altos requerimientos que no permiten pérdida de desempeño.

2.3.1 Tipos De Plataformas

En general las plataformas se categorizan en tres tipos: Modulares, escalables y generacionales.

- Modulares: también conocidas como plataformas funcionales, es la que permite la creación de variantes de productos funcionalmente diferentes realizando la adición o sustracción de módulos completamente definidos y diferenciados entre sí, ejemplo de estas son: los computadores, algunas herramientas manuales, el hardware “*open source*” (fuente abierta) desarrollado por Bug Labs. Permite lograr ventajas competitivas en cuanto a mayor cobertura horizontal del mercado y a la posibilidad de obtener productos configurables o personalizables.

Figura 6. Ejemplo de plataforma modular



Fuente: www.buglabs.com

- Escalables: son las que permiten la creación de productos funcionalmente idénticos pero con distintos niveles en sus prestaciones, por ejemplo los reductores de transmisión por engranajes o sistemas más complejos como los camiones de la serie NxR de la compañía Chevrolet® (ver Figura 7). Este tipo de plataforma permite mejorar la cobertura vertical del mercado y genera

ventajas competitivas, derivadas especialmente por la compartición de procesos desde la detección necesidad hasta la puesta en el mercado.

Figura 7. Ejemplo de Plataforma escalable, camiones de carga



Fuente: Chevrolet Company.

- Generacionales: aquellas que pueden ser utilizadas para el rápido desarrollo de las siguientes generaciones del producto, como los computadores que tienen interfaces estandarizadas para componentes de corto ciclo de desarrollo, esto permite la rápida y fácil implementación de nuevas tecnologías sin cambiar la plataforma base. Un ejemplo de esta son las impresoras por inyección de tinta, como las desarrolladas por Hewlet Packard. Aseguran una continuidad de elementos clave dentro del producto, los consumibles o elementos de mayor uso en el mismo.

2.4 PORTAFOLIOS DE PRODUCTOS Y TIPOS

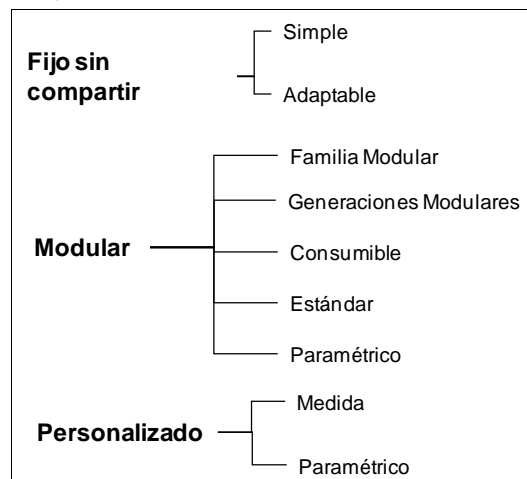
Se puede entender por portafolio la compilación de todos los productos ofrecidos por una empresa, dada una integración y racionalización de procesos, elementos, e información que se comparten en todos esos productos, de manera que se maximiza el uso de las capacidades de la empresa y se ofrece amplia variedad de productos.

La arquitectura del portafolio se puede definir como fija, modular y ajustable. La diferencia entre ellas radica en cómo manejan la variedad¹⁵, es decir, como abarcan las desviaciones en los requerimientos que exige el mercado; por lo tanto

¹⁵ KRISHNAPILLAI, Rajeev and ZEID, Abe. Mapping product design specification for mass customization. En: Journal of intelligent manufacturing. (2006); p. 1-15.

el tipo de portafolio que se ofrezca estará basado en la identificación de las necesidades del cliente.

Figura 8. Tipos de Arquitectura de Portafolio



Fuente: OTTO, Kevin; WOOD, Kristin. *Product Design*. Prentice Hall, 2001,

2.5 CONSIDERACIONES PARA LA OBTENCIÓN DE PLATAFORMAS

El desarrollo de productos basados en plataformas depende de muchos factores, que incluyen tecnología, costo, competencia, y consideraciones sobre el ciclo de vida¹⁶. A demás de esto, se debe tener presente la homogeneidad/heterogeneidad de los productos elaborados por la empresa a la hora de desarrollar una plataforma.

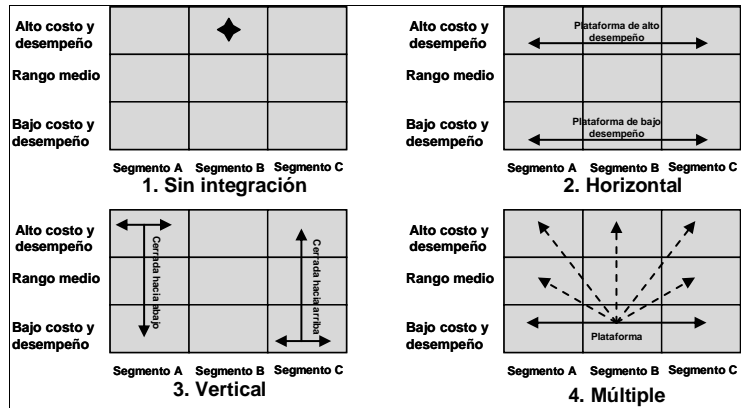
Dentro del desarrollo de productos se debe analizar la interacción del producto con el mercado, y la forma como se pretende entrar al mismo. Para planificar y decidir sobre el tipo de plataforma o forma del portafolio de productos se debe desarrollar una correlación entre los productos de la empresa y los segmentos de mercado.

¹⁶ Timothy W. Simpson et al, ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference.

Existen cuatro estrategias de integración (ver Figura 9) del producto dentro de los niveles del mercado objetivo; dado las características de cada segmento y las expectativas de la empresa sobre como entrar se pueden tomar decisiones sobre el diseño de los productos ofrecidos, estas son:

- Sin integración: En este tipo de estrategia no se busca un objetivo particular del mercado, sino resaltar las características especiales del producto y se aplica para el caso de productos de lujo.
- Integración horizontal: busca cubrir algún tipo de mercado en particular, ya sea de alto o bajo nivel de adquisición. Un ejemplo de este tipo de integración son los automóviles Volkswagen que poseen una plataforma compartida con los Skoda, Seat y los Audi que cubren diferentes niveles de desempeño compartiendo la misma plataforma.
- Integración vertical: para este caso la plataforma de diseño se comparte persiguiendo diferentes niveles de desempeño en los niveles de exigencia de los mercados, es decir, cubrir productos desde bajo hasta alto desempeño o características más elevadas. Este tipo de estrategia requiere mayores esfuerzos a la horizontal por la posible necesidad de albergar más funciones en la plataforma. Un ejemplo de estas son las herramientas manuales de Black & Decker y Dewaltt.
- Integración múltiple: esta es la estrategia más ambiciosa para una plataforma ya que busca abarcar las características de las dos anteriores.

Figura 9. Estrategias de integración de plataformas de productos



Fuente: TIMOTHY W. SIMPSON "Product platform design and customization: Status and promise". 2004.

Comentado [PSU13]: Esta figura no se lee bien. Hay que cambiarle la resolución.

2.6 METODOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE PLATAFORMAS

A continuación se muestra un resumen de dos metodologías que se analizaron en la revisión bibliográfica, estas se relacionan con productos metalmecánicos, y sirven de fundamento para el trabajo desarrollado. Es importante recordar la variedad de métodos¹⁷ para solucionar u optimizar problemas en el desarrollo de un producto, se seleccionaron estas dos por ser aplicadas a sistemas similares a los silos metálicos.

2.6.1 Escalamiento de productos

La primera metodología que se muestra es el escalamiento de productos, esta puede ser utilizada en productos que cumplen la misma función pero son requeridos en diferentes capacidades. Dos aspectos que se tienen presente son la similitud geométrica y el principio físico de funcionamiento del producto, los cuales deben procurar mantenerse en todos los productos. El objetivo es definir el factor de escalamiento para los productos intermedios y así cubrir un rango de capacidades deseadas.

¹⁷ JIAO, Jianxin. SIMPSON, Timothy W. and SIDDIQUE, Zahed. "Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review". Journal of Intelligent Manufacturing, 2007. 18:5–29.

Pasos para el escalamiento

Para la obtención de productos escalados Pahl & Beitz ¹⁸ recomiendan utilizar la siguiente metodología:

- a) Paso 1: definir el tamaño más grande y el más pequeño que se pueden producir y la rentabilidad de venta del producto. Estos tamaños se pueden definir de manera que sean factores decimales como por ejemplo: $\text{mayor/menor} = 10n$, donde $n = 1, 2, 3, \dots$, y se denominan década.
- b) Paso 2: determinar el número de tamaños " k " que se quieren proveer de cada década. El tamaño de la relación se puede calcular como $i = 101/k$. finalmente el número de pasos en cada década puede ser calculado estadísticamente, si la demanda del producto es muy grande será mejor un alto número de intervalos dado que el volumen de producción para cada tamaño será lo suficientemente alto para ser rentable.

2.6.2 Método de la teoría constructiva de plataforma de productos

Esta metodología busca una aproximación que permita sintetizar múltiples métodos de ofrecer variedad en el desarrollo de productos personalizados. Hernández¹⁹ representa el problema de diseño como el acceso a un espacio geométrico; el acceso óptimo se obtiene como las trayectorias óptimas que unen todos los puntos de un área "S" con el destino común "O" (plataforma). Cada especificación del producto, que tenga una variedad, se representa como una dimensión del espacio. Ver Figura 10.

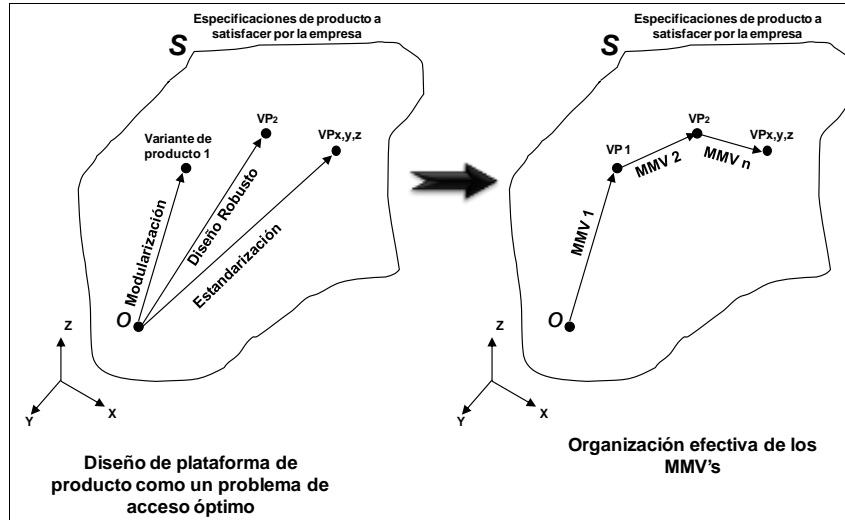
Para crear una familia de producto especializado, el diseñador desearía relacionar todas las variaciones de producto posibles en el espacio desde una estructura base de componentes o plataforma ("O" en la Figura 10). La forma en que se define un producto determinado con sus variables, es a través de los Modos de Manejo de la Variedad (MMV); estos modos pueden ser aproximaciones genéricas en el diseño de producto o su proceso de manufactura tales como: diseño modular, estandarización de la plataforma, diseño robusto, diseño a la medida, u otro tipo de variable de diseño.

Comentado [PSU14]: Evita etc. Usa por ejemplo: ...u otro tipo de variable de diseño

¹⁸ PAHL G.; BEITZ W, et all. "Engineering Design: a Systematic Aproach". Third Edition, Springer, London. 2007. 617 p.

¹⁹ HERNÁNDEZ G. ALLEN, J. Platform Design For Customizable Products As A Problem Of Access In A Geometric Space. *Eng. Opt.*, 2003; 35 (3). p. 229–254.

Figura 10. Representación de la metodología de Hernández (2003) y su solución



Hernández propone solucionar este problema de acceso geométrico a través de la aplicación jerárquica de los MMV del producto, el problema se formula como una decisión multi-etapa donde los rangos de aplicación de cada MMV son las variables de decisión. Lo que busca cada decisión es mejorar la función objetivo global (costo, desempeño, utilidad, entre otras.), de manera que se ofrezca eficientemente la variedad de producto.

Comentado [PSU15]: evitar

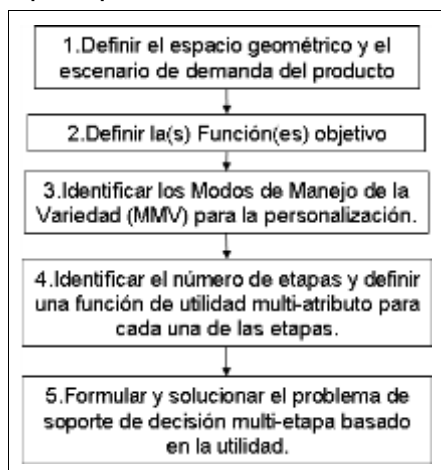
En un trabajo posterior²⁰ se modificó el método de Hernández de manera que se pudieran manejar múltiples objetivos y después Williams et al²¹, incorporó la variación en la demanda del mercado de manera que se mejorara el método.

Para la aplicación de este método se asume que la fase de diseño conceptual y el inicio del diseño básico han sido desarrolladas, por lo cual se tiene pleno entendimiento de las variables involucradas en el comportamiento del producto, incluyendo los aspectos generales del costo, así como de las restricciones o limitaciones en cada una de sus variables. En la Figura 11 se muestran las etapas del método.

²⁰ CARONE, M. J., WILLIAMS C. B, ALLEN J. K and MISTREE F.. "An Application of Constructal Theory in the Multi-Objective Design of Product Platforms," 2003, *Proceedings of the 2003 ASME Design Theory and Methodology Conferences*, Chicago.

²¹ Williams, Christopher et al. Designing platforms for customizable products in markets with non-uniform demand. ASME. (sep. 2004); p. 1-13.

Figura 11. Metodología Propuesta por Williams et al.



- Paso 1: Definición del espacio de personalización por medio de tres aspectos.
a) Identificación del parámetro del producto que varía de acuerdo a las demandas del cliente. b) Los límites de variación en que será ofrecido cada parámetro. c) El análisis de la demanda del mercado.
- Paso 2: Definición de la función objetivo. En esta etapa se define el objetivo de acuerdo a la meta de la empresa con respecto al producto, ya sea persiguiendo una mayor utilidad, disminución de material en inventario u otro aspecto pertinente.
- Paso 3: Identificación de los Modos del Manejo de la Variedad (MMV). En esta etapa se busca encontrar como variará el producto para satisfacer las especificaciones personalizadas en el espacio definido. La determinación de los MMV son decisiones estratégicas que involucran el diseño y las capacidades de manufactura de la empresa. En esta etapa es donde se realizará el mayor aporte de esta investigación.
- Paso 4: Identificación del número de niveles de jerarquías, ubicación de los MMV en estos niveles y definición de la función de utilidad para cada etapa.
- Paso 5: Finalmente se debe formular y solucionar el problema de decisión multi-etapa, el cual define los niveles en que se debe dividir los parámetros de

diseño del producto de manera que se ofrezca el mejor portafolio de productos teniendo presente la demanda del mercado.

2.7 CONSIDERACIONES SOBRE SILOS Y SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Los silos son sistemas de almacenamiento principalmente utilizados como captadores y dosificadores de material granulado, aunque también pueden ser utilizados para líquidos, en ambos casos se analizan los sujetos a presión atmosférica. Constan de un cuerpo cilíndrico y dependiendo de su tipo, pueden tener o no, una tolva inferior para la salida del material y elementos accesorios como escaleras, ventanas de inspección, u otros elementos que se puedan aplicar dependiendo de la aplicación.

En la Figura 12 se muestra un silo sin tolva inferior, los cuales son empleados comúnmente en almacenamiento de líquidos y algunos granos. Se observa el cuerpo cilíndrico y el techo en forma de cono junto con otros accesorios. Los silos pueden ser fabricados de diferentes materiales: aceros al carbono, inoxidable, galvanizados y poliméricos, y diferentes tipos de láminas: lisas o corrugadas, teniendo cada una de ellas sus aplicaciones.

Figura 12. Silos para almacenamiento de líquidos



Fuente: <http://www.scafco.com>

Dependiendo del área disponible, o de factores de manejo del material como clasificación, los silos pueden ser configurados como grupos de éstos, formando baterías de silos donde se logra almacenar grandes volúmenes, a pesar de que el área efectiva ocupada por la batería de silos es menor que el utilizar uno solo en un espacio cuadrado equivalente.

Comentado [PSU16]: Evita el uso de etc. Reemplaza este termino por otros atributos que se conocen y se termina la frase diciendo .. y otros elementos que pudiesen tener dependiendo de su aplicación o uso.

Figura 13. Batería de silos.

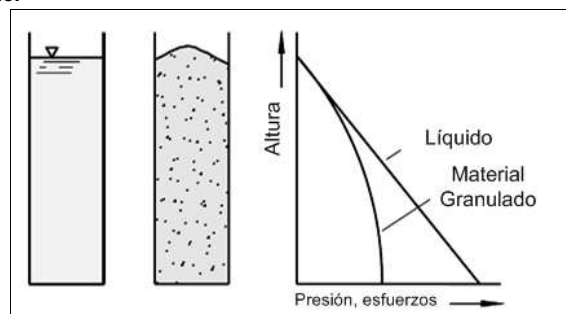


Fuente: <http://www.simeza.com>

2.7.1 Ecuaciones para el diseño de silos

Para el diseño de silos se debe tener presente el tipo de material que se va almacenar, siendo más crítico el comportamiento de los líquidos que el del material granulado, ver Figura 14.

Figura 14. Comportamiento de la presión y los esfuerzos en los silos de acuerdo al tipo de fluido almacenado.



Fuente: SCHULZE, D. *Powders and Bulk solids. Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Springer, New York. 2008,

Una ecuación general para el cálculo de los esfuerzos cortantes en las paredes de un silo, en su sección cilíndrica, viene dada por la siguiente expresión:

$$\tau_w = \frac{g \rho_b A}{U} + \left[K \tan \varphi_x \cdot \sigma_{v0} - \frac{g \rho_b A}{U} \right] \cdot e^{\frac{-K \tan \varphi_x U z}{A}} \quad [1]$$

Donde

- K = Relación esfuerzos horizontales y verticales en las paredes del silo.
 ρ_b = Densidad del material
 φ_x = Ángulo de fricción del material con las paredes
 σ_{v0} = Esfuerzos verticales en la base del silo
 U = Resistencia del material.

Comentado [PSU17]: Cambia el Font o usa editor de ecuaciones

Comentado [PSU18]: Cambia el Font o usa editor de ecuaciones

Ahora bien para valores altos del término en el exponencial de la ecuación anterior, el valor de los esfuerzos verticales se puede evaluar con la siguiente expresión:

$$\sigma_{v\infty} = \sigma_v(z \rightarrow \infty) = \frac{g \rho_b A}{K \tan \varphi_x U} \quad [2]$$

En este caso σ_v es independiente de la altura y proporcional al diámetro del silo. De lo anterior se infiere que es posible diseñar silos esbeltos para material granulado, mientras que para líquidos es preferible utilizar silos cortos y de mayor diámetro, debido a la presión hidrostática.

Para el diseño de los silos en el ejercicio propuesto en esta investigación se utilizará una expresión simplificada que considera el almacenamiento de líquidos o material granulado. Se empleará la siguiente ecuación que relaciona la carga generada por la componente del peso de material almacenado, de la siguiente manera:

$$Pe = \frac{(2 \cdot \pi \cdot t \cdot Syt)}{y \cdot D \cdot SF} \quad [3]$$

Donde:

- Pe : Peso específico del material a almacenar
 y : Altura del silo
 D : Diámetro del silo
 SF : Factor de seguridad
 t : Espesor del material
 Syt : Resistencia última del material del silo.

Comentado [PSU19]: Cambiar el Font a Italic o usar el editor de ecuaciones.

Comentado [PSU20]: Cambiar el Font a Italic o usar el editor de ecuaciones.

Comentado [PSU21]: Cambiar el Font a Italic o usar el editor de ecuaciones.

Comentado [PSU22]: Cambiar el Font a Italic o usar el editor de ecuaciones.

Comentado [PSU23]: Cambiar el Font a Italic o usar el editor de ecuaciones.

2.8 TIPOS DE COMPORTAMIENTO DE DEMANDA DE MERCADO

Uno de los grandes objetivos del desarrollo de un producto es obtener la mayor participación en un segmento de mercado y lograr las mejores ganancias, por lo tanto, surge el interrogante de cómo se puede modelar un determinado segmento de mercado previo a la incursión del producto.

Williams²² propone que el comportamiento no uniforme de la demanda de un mercado puede ser modelado por medio de cuatro tipos de formas. Cada una de éstas debe ser evaluada por el equipo de diseño para analizar la oferta de sus productos y plantear estrategias que permitan abarcar una mayor parte del mercado.

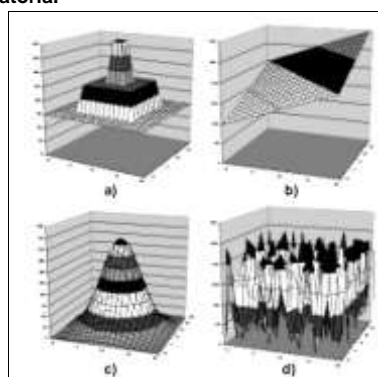
La tendencia en la que una demanda se comporta puede estar enmarcada en uno de los cuatro tipos que son: 1. Demanda discreta o puntual, en la que hay una marcada escogencia hacia un grupo de dimensiones o características del producto, 2. Lineal, positiva o negativa, en la medida que crecen las dimensiones del producto así aumenta la cantidad de ventas estimadas o viceversa, 3. Distribución normal, es la más esperada en los mercados y atiende a comportamientos estadísticos típicos, 4. Aleatoria, es la más compleja de cubrir por su misma naturaleza.

En la Figura 15 se muestra la gráfica de las formas de demanda según el escenario, para el caso desarrollado también se plantearon cinco escenarios de demanda (ver anexos). Se incluyó la demanda lineal, positiva y negativa, estas dos en particular representan una forma típica de mercado para los silos metálicos, para el caso de la industria cementera son más utilizados los de mayor tamaño, mientras que para industrias como la farmacéutica o la de alimentos se utilizan más los silos de menor tamaño y peso específico.

En la Tabla 2 se muestra el resumen de los escenarios de demanda utilizados, cada una de estas es una hoja de cálculo que se utiliza en la metodología como valores para ser leídos.

²² Op cit Williams, Christopher et al.

Figura 15. Modelación de comportamientos de demanda no-uniforme. a) discreta b) lineal c) distribución normal d) aleatoria.



Fuente: Williams, Christopher et al. 2004.

Los Valores extremos para las variables se tomaron basados en el análisis de los portafolios ofertados por las empresas fabricantes de silos (ver anexos 2 y 3) y se definió una división en intervalos tales que se hiciera la mayor discretización, teniendo en cuenta la capacidad de la hoja de cálculo.

Tabla 2. Resumen de valores en escenarios de demanda utilizados.

Tipo de Demanda	# Tipos de Silos Demandados	Intervalo de valores		Dimensiones de la matriz (elementos)
		Volumen (m ³)	Peso espec.(N/m ³)	
Puntual	121014	2-10040	2000- 14700	519 X 255
Lineal Positiva	62880	2-10040	2000- 14700	519 X 255
Aleatoria	62880	2-10040	2000- 14700	519 X 255
Lineal Negativa	62880	2-10040	2000- 14700	519 X 255
Gaussiana	43112	2-10040	2000- 14700	519 X 255

3. METODOLOGÍA DESARROLLADA

Este trabajo establece pasos lógicos para la obtención del portafolio de productos y propone unos lineamientos que podrían aplicarse en el desarrollo de sistemas metalmecánicos. La metodología que se desarrolla en este trabajo se fundamenta en la investigación iniciada por Hernández et al. Y complementada por Williams, como se mostró en el capítulo anterior.

Una de las modificaciones que se hace en la nueva metodología es iniciar el desarrollo del portafolio de productos de la empresa considerando restricciones técnicas para parametrizar algunas de las variables de diseño del producto. Para esto se utilizan algunas de las recomendaciones desarrolladas por Palz & Beitz²³ en el desarrollo de productos escalables y modularizados, por lo tanto se deben conocer los principios que están involucrados en el diseño del producto y las variables que definen su comportamiento.

Otra modificación es el criterio de selección de los elementos que harán parte de la familia de ese producto, se propone que se seleccionen los niveles de importancia de las variables de diseño por medio de la mayor desviación estándar que se obtenga en la variable de respuesta del diseño. El objetivo es encontrar qué niveles de las variables de diseño representan un mayor interés económico para la empresa y ofrecerlos de acuerdo al tipo de mercado.

El producto de la desviación estándar de las variables de respuesta, es la métrica para evaluar la variabilidad generada por las variables de diseño. En la medida que esas variables generen mayor variedad de productos representan mayor importancia para la empresa. La metodología propuesta se resume en la figura siguiente:

²³ PAHL G.; BEITZ W, et al. "Engineering Design: a Systematic Approach". Third Edition, Springer, London. 2007. 617 p.

Figura 16. Metodología Propuesta



3.1 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA AL DISEÑO DE SILOS

Por variables de diseño se puede entender como las que definen el comportamiento de la función principal del producto. Las restricciones técnicas, por otra parte, atienden a límites en el diseño que pueden estar definidos por capacidades de la empresa (fabricación, y/o cadena de suministro), o por normas en el diseño del producto.

Para la validación de la metodología, ésta se aplica al diseño del portafolio de silos ofrecidos por una empresa del sector metalmecánico. Se establecieron parámetros límites dentro de las variables de diseño; que en este caso también dos de ellas coinciden con los criterios básicos para la selección del producto por parte del consumidor: el volumen y la densidad del material. Dichas restricciones son:

- Volumen del silo entre 5 y 10000 m³.

La restricción de límites de volumen se tomó basándose en los tamaños ofertados en catálogos de diferentes fabricantes^{24, 25, 26} consultados, ver anexo 2 y 3.

- Espesores de lámina empleado para la fabricación, Acero A-36 de espesores 1/8" - 1/4" - 3/8" - 1/2"
- En este ejercicio se propone utilizar las láminas de acero al carbono en las dimensiones con que se comercializa localmente, se utilizará la de dimensiones 8' x 20' (2.438m x 6.096m).
- Peso específico de materiales a almacenar entre 2000 N/m³ y 14700 N/m³, lo anterior para cubrir los límites de acuerdo a la tabla del Anexo 1.

3.1.1 Análisis de las Restricciones de Diseño y Técnicas

En el diseño de los silos, la selección del cliente se da principalmente por el volumen y la densidad del material que va almacenar; lo anterior sirve para definir las variables de respuesta del producto. Por otra parte, se conoce claramente la relación entre las variables de diseño: la altura, el diámetro y el espesor de las láminas empleadas.

Para el diseño del silo y de los esfuerzos que soportan las láminas con que se fabrica, se empleará la ecuación 3 mostrada en la sección 2.7.1. Esta ecuación, a pesar de ser simplificada, relaciona adecuadamente las variables de diseño.

Tabla 3. Resumen de variables y límites en el diseño de los silos.

Límites y Variables de Diseño para los Silos		
Volumen	5 - 10000	m ³
Peso Específico del Material	2000 - 14700	N/m ³
Tamaño de Láminas	2430 x 6096	Mm
Espesores de Láminas	1/8, 1/4, 3/8, 1/2	In

3.1.2 Definición de tipos de arquitectura aplicable e identificación de los MMV para la personalización

Los modos de manejo de la variedad que se seleccionaron para el diseño de los silos son: escalonamiento y diseño modular. Escalonamiento, debido al espacio de

²⁴SCAFCO. Fabricante de silos. Disponible en Internet [23/11/2007].
<http://www.scafco.com/spanish/grain/ManualsAndDrawings.html>

²⁵SIMEZA. Fabricante de Silos para Granos. Disponible en Internet [22/11/2007]
<http://www.simeza.com/product3.html>

²⁶DOHOGNE. Fabricante de silos modulares. Disponible en Internet [23/11/2007]
www.DOHOGNE.COM

volúmenes que se pretende cubrir. Diseño modular, para generar la menor cantidad de elementos diferentes.

La variable altura y diámetro se escalan basados en incrementos enteros dados por el tamaño de las láminas. Para la altura se selecciona el principio de modularidad de apilamiento, es decir, que se colocan uno sobre otros anillos de un mismo diámetro hasta lograr una altura determinada.

Se define que se fabricarán los silos con las láminas sin cortar, es decir, se curva en segmentos de circunferencia hasta formar un anillo de un determinado diámetro y luego se apilarán anillos del mismo diámetro hasta construir el silo. El MMV de escalamiento se restringirá a los pasos dados por la geometría que se obtenga de utilizar láminas sin cortar.

Lo anterior se resume en que las variables de diámetro y altura del silo se representarán como #L y #M respectivamente. El número de láminas (#L) son las láminas que se rolan para formar el cilindro de un diámetro determinado y el número de módulos (#M) son los anillos con el mismo #L que se pueden apilar para alcanzar un volumen dado.

3.1.3 Parametrización del diseño y generación de productos factibles

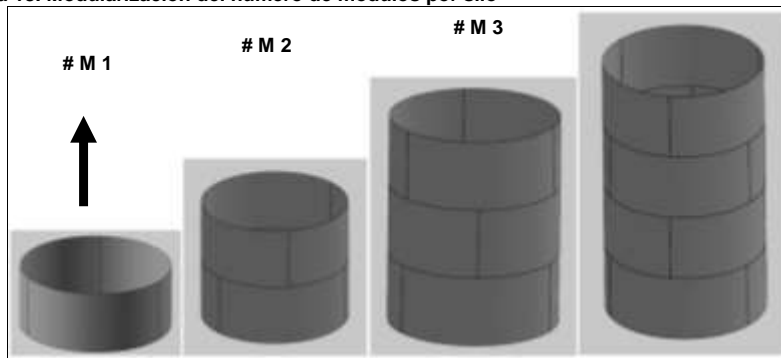
El número de láminas que se utiliza en cada anillo permite definir el módulo a partir del cual se forma el silo, esto define el radio de curvatura que se le aplica a la lámina.

Figura 17. Modularización del número de láminas por módulo



Cada uno de los módulos #L se puede apilar hasta llegar a la altura del silo deseada, en la figura siguiente se muestra el apilamiento de módulos para el módulo hecho de tres láminas.

Figura 18. Modularización del número de módulos por silo



Se introduce una restricción de diseño que relaciona la altura y el diámetro del silo la cual se denomina esbeltez²⁷ (h/D) y debe estar entre 1 y 6, lo anterior obedece a que valores menores de 1 en la esbeltez no confinarían el material hacia las paredes del silo, es decir, para un mismo volumen el material granulado se apilaría formando un cono sin tocar las paredes. En el caso de una esbeltez mayor de 6 se generarían esfuerzos muy altos en las paredes y se necesitarían espesores mayores.

Para la generación de los productos factibles a diseñar, se combinan todas las posibilidades de las variables de diseño y se obtienen los espesores de los mismos. En el algoritmo desarrollado se generan todos los silos posibles con el espesor de lámina que resiste los esfuerzos del material almacenado, con la restricción de que un módulo superior no puede ser de una lámina de mayor espesor que la del módulo inferior, y que no supere los #M y #L máximos. Ver Tabla 4.

²⁷ SCHULZE, D. Powders and Bulks solids. Behavior, Characterization, Storage and Flow. Springer, New York. 2008, p. 263.

Tabla 4. Parámetros para la generación de los silos factibles de fabricación

RESTRICCIONES DE FABRICACIÓN	Ancho de Lámina (ft)	20
	Alto de Lámina (ft)	8
	Resistencia Última (Pa)	2.50E+08
	Espesores (in)	0.125
	Número de Módulos	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
	Láminas por Módulo	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
RESTRICCIONES DE DISEÑO	Factor de Seguridad	2.5
	Esbeltez Menor	1
	Esbeltez Mayor	6

3.1.4 Evaluación económica de los productos incluyendo el escenario de demanda

En esta etapa se busca cuantificar cada solución de producto factible de acuerdo a las restricciones que se hayan planteado en el paso anterior, se planteó un modelo de costos de la siguiente manera:

$$C_i = k_1 \cdot VolAcero + k_2 \cdot Lsoldadura + \sum_{i=1}^p \frac{k_3 \cdot t_i}{n_L}$$

Donde:

$$VolAcero = \sum_{i=1}^m n_L \cdot t_i \cdot h_L \cdot x_L \quad VolAcero = \sum_{i=1}^m \#L \cdot t_i \cdot h_L \cdot x_L$$

$$Lsoldadura = (n_m \cdot n_L \cdot h_L) + ((n_m - 1) \cdot (n_L \cdot x_L))$$

$$Lsoldadura = (\#M) \cdot (\#L) \cdot h_L + (\#M - 1) \cdot (\#L \cdot x_L)$$

n_m : número de módulos
 n_L : número de láminas
 h_L : altura de lámina
 x_L : ancho de la lámina
 t_i : espesor de la lámina

Además del costo se evalúa la ganancia que obtendría la empresa dado un escenario de demanda del producto, para el caso de los silos se proponen 5

Comentado [PSU24]: Cambio de Font o uso del editor de ecuaciones

Comentado [PSU25]: Cambio de Font o uso del editor de ecuaciones

Comentado [PSU26]: Cambio de Font o uso del editor de ecuaciones

Comentado [PSU27]: Cambio de Font o uso del editor de ecuaciones

Comentado [PSU28]: Cambio de Font o uso del editor de ecuaciones

escenarios de demanda como los utilizados por Williams²⁸. Lo que se busca es evaluar cómo responde el método ante una forma específica de la demanda prevista, o histórica, del mercado de un producto. Estos escenarios describen de forma general los posibles comportamientos que pueden llegar a tener los mercados, respecto a un producto determinado.

Los escenarios que se utilizan son: 1) Una demanda puntual, la cual discrimina marcadamente un determinado grupo de productos frente a los demás. 2 y 3) Demanda lineal positiva o negativa, aquí los clientes prefieren los valores extremos ofrecidos. 4) Aleatoria, es el más complejo de los escenarios ya que no hay un patrón de comportamiento definido y 5) Gaussiana, aquí el mercado responde de manera normalizada. Las gráficas de los escenarios de las demandas se pueden ver en los anexos.

La ganancia se calcula como un porcentaje del costo del silo y el número de unidades esperados en la demanda, por lo tanto se tiene:

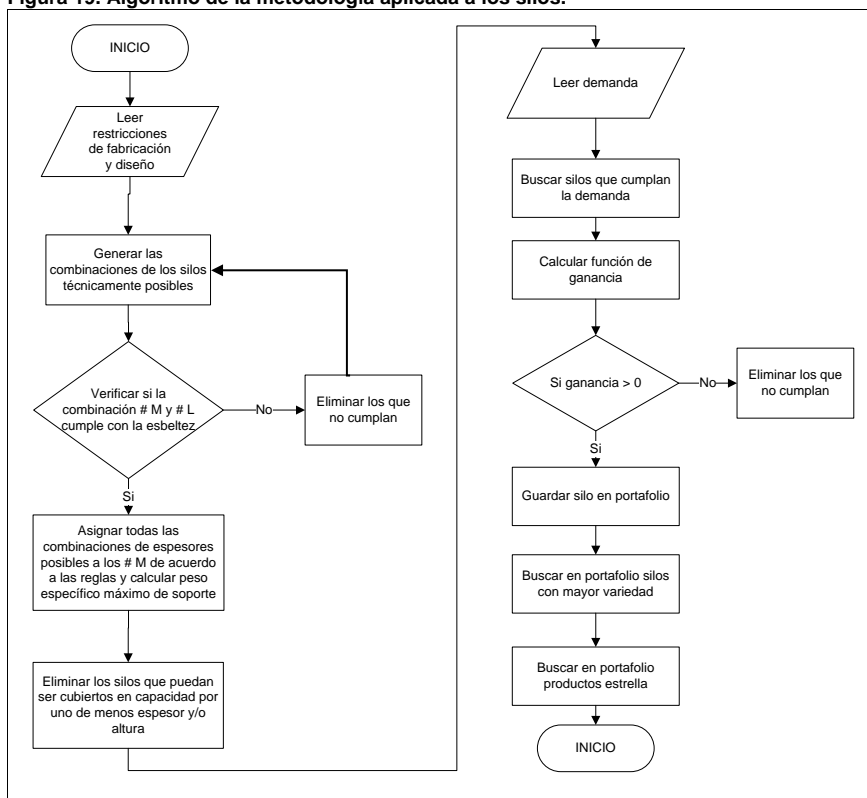
$$G = \sum_{i=1}^q k_4 \cdot C_i \cdot D_i$$

Donde D_i es la cantidad de silos demandados.

A continuación se presenta el algoritmo del programa que se ejecutó para cada una de los cinco escenarios de demanda que se plantearon. Se desarrolló en Microsoft Excel y su código fuente puede ser visto en el Anexo 9.

²⁸ Williams, Christopher et al. Designing platforms for customizable products in markets with non-uniform demand. ASME. (sep. 2004); p. 1-13.

Figura 19. Algoritmo de la metodología aplicada a los silos.



3.1.5 Selección de los niveles de las variables de diseño a ofertar y creación del portafolio de productos

Un criterio de selección que se empleó para jerarquizar los silos que presentan una mayor ventaja para la compañía es la variabilidad. Este término se calcula a partir de la desviación estándar de las variables de respuesta: el volumen del silo y el peso específico máximo que soporta.

Es decir que para cada una de las variables de diseño: #M, #L y espesor se calcula que tanta variabilidad generaron en el volumen y peso específico. Lo

anterior se hace filtrando los valores correspondientes a cada variable y tomando el valor de la desviación estándar para esos valores, luego se agrupan por variables y se define el nivel de jerarquías. En la Tabla 5 se muestra un ejemplo de cómo quedan los valores para una de las corridas realizadas.

Tabla 5. Resultados de cálculo de variabilidad para una corrida de datos.

Variabilidad debido a los espesores			Variabilidad debido al número de módulos			Variabilidad debido al número de láminas		
2,5E+14			1,7E+14			7,4E+12		
Espesores	Desv. Est. del Volumen	Desv. Est. del Peso Específico	Número de Módulos	Desv. Est. del Volumen	Desv. Est. del Peso Específico	Láminas por Módulo	Desv. Est. del Volumen	Desv. Est. del Peso Específico
0,125	6,8E+05	7,4E+07	1			1	1,3E+01	3,1E+07
0,25	3,2E+06	1,3E+07	2			2	1,6E+03	1,3E+07
0,325	6,8E+06	1,3E+07	3	5,1E+03	1,6E+08	3	1,5E+04	1,1E+07
0,5	6,4E+06	1,1E+07	4	5,3E+04	5,3E+07	4	4,2E+04	1,2E+07
			5	1,5E+05	1,4E+07	5	1,1E+05	1,4E+07
			6	4,1E+05	1,4E+07	6	1,9E+05	9,5E+06
			7	1,1E+06	1,3E+07	7	2,4E+05	6,4E+06
			8	2,9E+06	1,1E+07	8	2,7E+05	3,4E+06
			9	5,2E+06	8,4E+06	9	2,2E+05	1,7E+06
			10	9,0E+06	7,5E+06	10	3,3E+05	1,1E+06
			11	1,9E+05	7,8E+05			
			12	0,0E+00	3,8E+05			

El significado de la variabilidad se entiende como la incidencia en las variables de respuesta del producto, dado unos niveles de las variables de diseño. En el caso analizado son las variables Volumen y Peso específico, es decir, que la variable con mayor variabilidad es la que representa una mayor capacidad de definir posibilidades o capacidades del producto; y por consiguiente en el mercado.

Un concepto que se propone es el de “Producto Estrella”, el cual corresponde a la familia de productos que se seleccionan por la jerarquía obtenida y además tienen la mayor ganancia. Este concepto representaría los productos que mas prestaciones le dan a la empresa, ya que son los de mayor jerarquía, por lo tanto tienen mayor representación sobre el escenario de demanda analizado y por otra parte tienen la mayor ganancia.

3.2 PLANTEAMIENTO DEL MÉTODO DE WILLIAMS PARA SILOS METÁLICOS

Para realizar una comparación de los resultados en la metodología propuesta, se planteó utilizar la metodología de Williams al caso del diseño del portafolio de productos de silos metálicos.

En la Figura 20 se muestra el algoritmo utilizado en la metodología de Williams. La principal diferencia respecto al trabajo desarrollado, es que en este se define un tamaño de partición de las variables de diseño por medio de la cual se pretende cubrir el rango a ofertar.

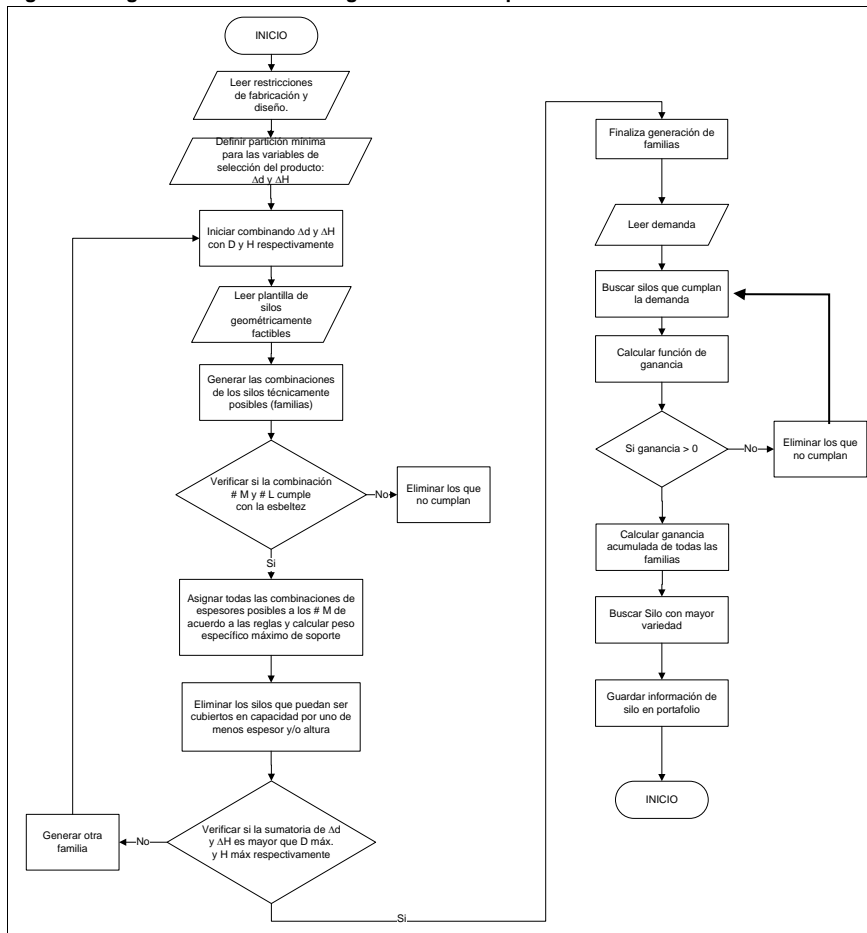
El tamaño de partición de las variables de diseño se denomina deltas de diámetro y deltas de altura, las que se utilizaron en el método de Williams se muestran en la

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Tabla 6. Particiones de las variables de diseño para el método de Williams.

Descripción		$\Delta D(m)$	$\Delta H(m)$
1	Incremento unitario	1	1
2	Incremento equivalente al tamaño de la lámina	1,94	2,438

Figura 20. Algoritmo de la metodología de Williams aplicada a los silos



Uno de los objetivos en el método que propone Williams es encontrar el tamaño óptimo de la división de las variables de diseño, de manera que se obtenga la mejor utilidad del producto, es decir, en que tamaño se deben hacer los incrementos de las variables de diseño y así dimensionar los productos. Los dos casos que se plantearon corresponden: el primero a incrementos de un metro en

el diámetro y la altura, es decir, cortar las láminas con estas dimensiones y unir las hasta llegar al tamaño deseado.

En segundo lugar se planteó para comparar el caso equivalente a la premisa utilizada en la metodología propuesta, es decir, que se hacen los incrementos en el valor exacto al tamaño de la lámina, esto con el fin de comparar adecuadamente ambas metodologías. Respecto a la función de costos se debe resaltar que en este caso si se incurre en cortes por lo tanto se agrega a la ecuación de la siguiente manera:

$$C_i = k_1 \cdot VolAcero + k_1 \cdot VolAcerodesperdicio + k_2 \cdot Lsoldadura + \sum_{i=1}^p \frac{k_3 \cdot t_i}{n_L} + k_4 \cdot Lcorte$$

La función de ganancia es igual que en el caso propuesto, al igual que los escenarios de demandas sobre los que se comparó los portafolios generados.

3.3 INDICADORES PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los resultados en las metodologías utilizadas en el diseño del portafolio de silos metálicos, se plantean indicadores que buscan comparar la bondad del método utilizado.

- Razón de Ganancias: es la división de las ganancias principales sobre las ganancias del portafolio. Donde las ganancias principales son la sumatoria de las ganancias del “espacio restringido”. El espacio restringido corresponde a todos los silos que son factibles de crear técnicamente y que además tienen ganancia, es decir cumplen con algún requerimiento de la demanda.
- Eficiencia del Portafolio: Es el cociente de la ganancia del portafolio entre el número de silos del portafolio, es decir en que tantos silos está representada la ganancia, en la medida que sea mayor significará que se necesitan hacer menos silos para obtener una misma ganancia.
- Ganancia Silos Principales: Es la sumatoria de las ganancias de los silos que tienen la mayor ganancia y además hacen parte de la jerarquía obtenida por el método.

En esta investigación se introduce el término **Silos Principales**, el cual hace relación a los silos con mayores beneficios. Este concepto se podría denominar **Productos Estrella**, es decir los productos que más le interesarían a la empresa fabricar ya que tienen mayor cobertura en el mercado y además producen las mayores ganancias.

Otro concepto relacionado, son los **Productos Estratégicos** los cuales no necesariamente ofrecen las mayores utilidades, pero son de interés para una empresa porque van de la mano de los objetivos o razón de la empresa, ejemplo de estos son las compañías de baterías, cuando venden lámparas de mano las cuales traen sus baterías, de cierta forma están asegurando su permanencia a través de la compra de la lámpara; este sería un producto estratégico.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las ejecuciones del algoritmo para la metodología propuesta se hicieron para cada una de los escenarios de demanda y con las restricciones de diseño y técnicas que se discutieron anteriormente. Para la metodología de William también se ejecutó el algoritmo propuesto, en ambos casos se obtuvieron los silos principales y las características de los mismos. El resumen de estos datos se encuentra en las siguientes tablas.

En la Tabla 7 se muestra una comparación de las características de los silos en los dos métodos, y en el de Williams aplicando los dos valores de incremento de las variables. Hay diferencias en cada escenario de demanda principalmente en los espesores, es importante resaltar que el espesor que se colocó corresponde al mayor de los que se empleen para apilar los módulos.

Tabla 7. Comparación de características de los silos con mayor ganancia

	CONFIGURACIÓN DEL SILO CON MAYOR GANANCIA														
	Puntual			L. Positiva			Aleatoria			L. Negativa			Gaussiana		
	# M	# L	t	# M	# L	t	# M	# L	t	# M	# L	t	# M	# L	t
Método Propuesto	9	11	0.5	9	11	0.5	9	10	0.5	9	10	0.5	9	8	0.5
Método Williams (Δ=1)	10	22	0,5	10	22	0,25	10	22	0,25	8	19	0,125	8	18	0,125
Método Williams (Δ= Equ. tamaño lámina)	9	11	0.5	9	11	0.25	9	11	0,25	9	11	0.25	9	11	0.25

Para cada escenario de demanda se calcularon el número de tipos de silos, es decir cuántos silos tenían una demanda mayor que cero. Un silo es el que corresponde a una exigencia de volumen y peso específico determinado en la demanda, y los silos ofertados corresponden a los silos que cumplen algún requerimiento de los demandados.

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos con el método propuesto y se observa que la variabilidad es cero solamente en el escenario de demanda lineal positivo, los demás tienen un valor diferente de cero. Es importante recordar que esta métrica es la que se definió como la indicadora de la familia con mayores ganancias dentro del portafolio que se obtuvo. Este grupo de silos se denominó silos principales.

Tabla 8. Resultados de la metodología propuesta según el escenario de demanda.

Método Propuesto								
Tipo de Demanda	# Silos ofertados	Variabilidad portafolio	Silos Principales	Variabilidad silos Principales	Ganancia Silos Principales	Razón de ganancias	Eficiencia del Portafolio	Eficiencia portafolio Principal
Puntual	461	1.03E+14	11	7.6E+19	1.98E+09	6.19%	6.94E+07	1.80E+08
Lineal Positiva	324	5.85E+13	6	0	1.75E+09	9.56%	5.65E+07	2.92E+08
Aleatoria	324	5.85E+13	15	9.30E+10	3.44E+09	13.87%	7.65E+07	2.29E+08
Lineal Negativa	324	5.85E+13	15	9.30E+10	2.75E+09	11.09%	7.65E+07	1.83E+08
Gaussiana	298	1.19E+13	35	5.31E+11	1.23E+09	26.28%	1.57E+07	3.51E+07

En la Tabla 9 se muestra el resultado del método de Williams para el incremento de un (1) metro en cada una de las variables, se observa que la variabilidad tiende a cero en los silos de mayor ganancia. En el método de Williams el criterio de escogencia del portafolio es sobre la mayor ganancia promedio.

Tabla 9. Resultados de la metodología de Williams utilizando Δ Variables de entrada = 1

Método Williams delta = 1								
Tipo de Demanda	# Silos ofertados	Variabilidad portafolio	Silos Principales	Variabilidad silos Principales	Ganancia Silos Principales	Razón de ganancias	Eficiencia del Portafolio	Eficiencia portafolio Principal
Puntual	598758	7.93E+30	286	0	1.28E+10	0.18%	1.16E+07	4.46E+07
Lineal Positiva	598758	7.93E+30	286	0	1.26E+10	0.32%	6.53E+06	4.42E+07
Aleatoria	598758	7.93E+30	286	0	8.72E+09	0.21%	6.84E+06	3.05E+07
Lineal Negativa	598758	7.93E+30	165	0	2.68E+09	0.08%	5.30E+06	1.62E+07
Gaussiana	598758	7.93E+30	165	0	9.12E+08	0.20%	7.79E+05	5.53E+06

Para buscar otra comparación al método planteado se utilizó un incremento equivalente al tamaño de la lámina, este se definió como un método de manejo de la variedad o principio de arquitectura en el método propuesto, no hacer cortes a la lámina. En la Tabla 10 se muestran estos resultados.

Tabla 10. Resultados de la metodología de Williams utilizando Δ Variables de entrada = tamaño de la lámina.

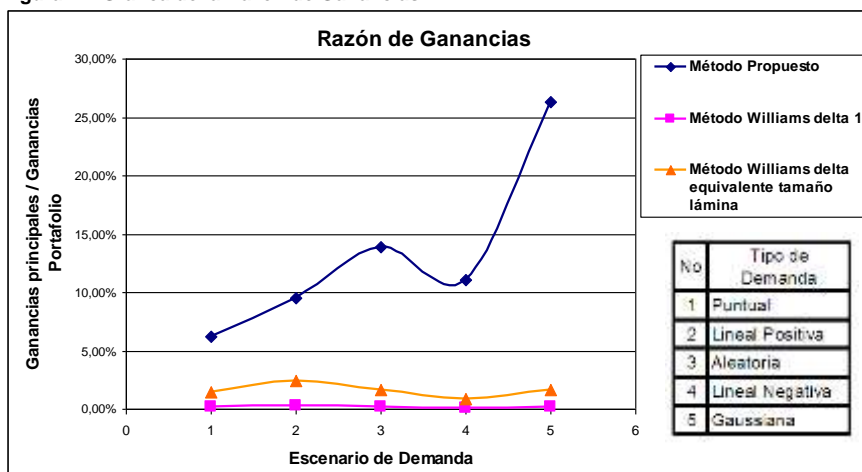
Método Williams delta equivalente tamaño lámina								
Tipo de Demanda	# Silos ofertados	Variabilidad portafolio	Silos Principales	Variabilidad silos Principales	Ganancia Silos Principales	Razón de ganancias	Eficiencia del Portafolio	Eficiencia portafolio Principal
Puntual	48010	1.85E+30	220	0	9.72E+09	1.46%	1.39E+07	4.42E+07
Lineal Positiva	48010	1.85E+30	220	0	7.64E+09	2.44%	6.52E+06	3.47E+07
Aleatoria	48010	1.85E+30	220	0	6.04E+09	1.63%	7.70E+06	2.74E+07
Lineal Negativa	48010	1.85E+30	165	0	2.75E+09	0.84%	6.80E+06	1.67E+07
Gaussiana	48010	1.85E+30	165	0	8.75E+08	1.63%	1.12E+06	5.30E+06

Para una mejor comparación de los métodos y sus resultados, se grafican los datos para los tres indicadores que se explicaron en el capítulo anterior, el primero es la razón de ganancias, en la Figura 21 se observa que el método propuesto tiene un valor mayor en todos los escenarios de demanda.

En el escenario de tipo normalizado o gaussiano es 25% mayor que en el método de Williams, esto indica que la mayor ganancia se obtiene en los silos principales.

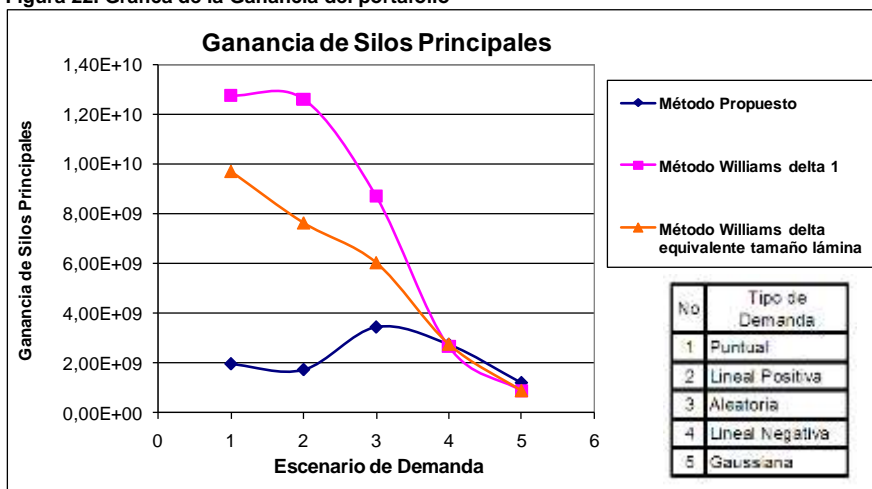
El menor valor obtenido con el método propuesto fue en la demanda puntual, mientras que el método de Williams no muestra mayor diferencia entre los dos valores de incremento utilizados, es decir, no hay mayor variación entre los tipos de demanda donde se aplica.

Figura 21. Gráfica de la Razón de Ganancias



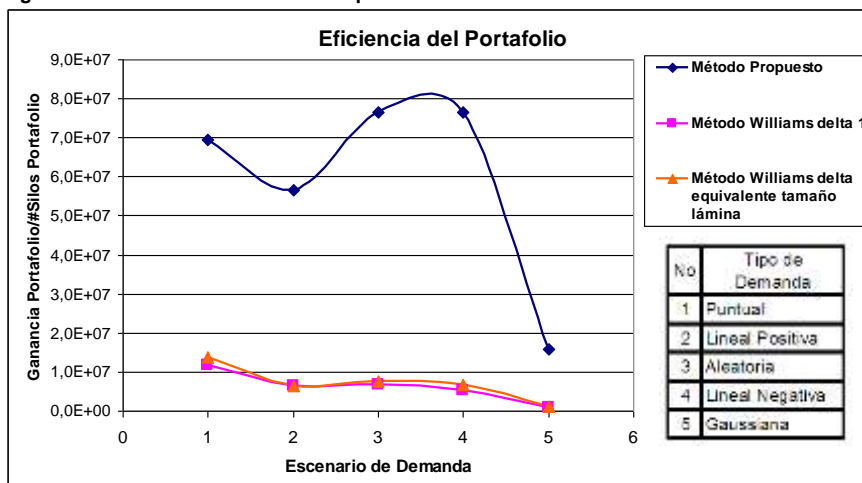
La ganancia de los silos principales para los dos métodos se muestra en la Figura 22, y se observa que para la demanda puntual es mayor en Williams con el incremento de las variables igual a 1, y para la demanda Gaussiana convergen los dos métodos.

Figura 22. Gráfica de la Ganancia del portafolio



El último de los indicadores, es la eficiencia del portafolio, el cual se observa en la Figura 23. Se observa que el método propuesto se comporta similar al de Williams, pero con mayor valor, tendiendo a igualarse en el escenario gaussiano.

Figura 23. Gráfica de la eficiencia del portafolio



Los algoritmos de los métodos analizados se ejecutaron en un computador tipo estación de trabajo con cuatro procesadores core® 2 duo de 2.3 GHz y 4 Gb de memoria ram, la tabla de resultados de los tiempos empleados en cada caso se muestra en la Tabla 11. Como comparación, se ejecutó en un computador de escritorio sencillo con un procesador core® 2 duo de 2.3 GHz y 1 Gb de memoria Ram y los resultados fueron aproximadamente el doble del mostrado en la tabla 11. En ambos casos se utilizó Windows® como sistema operativo.

Tabla 11. Tiempos de ejecución de los algoritmos.

	TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE ALGORITMOS (minutos)				
	Puntual	L. Positiva	Aleatoria	L. Negativa	Gaussiana
Método Propuesto	15	12	14	18	22
Método Williams (Δ=1)	800	750	1050	730	1206
Método Williams (Δ= Equ. tamaño lámina)	50	60	38	48	90

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un método con el cual se obtuvo una relación de ganancias de hasta un 11% mayor respecto al método propuesto por Williams, lo cual significa que con los tipos de silos encontrados se obtendrá una mayor ganancia. Adicionalmente por utilizarse menor variedad de silos se podrían tener menores inventarios, gestión de compras, menor variedad de diseños y a una mejor economía de escala por el mayor número de unidades demandas por cada tipo de silo.

En la exploración bibliográfica se encontró una serie de tendencias hacia el diseño de arquitecturas y los métodos para lograrlas. Con base a uno de ellos, el desarrollado por Williams, se propone una diferencia, que las jerarquías de las variables de diseño se determinen a partir de su incidencia en la variabilidad.

El concepto de variabilidad se utilizó como métrica de decisión para las jerarquías y además ayudó a automatizar el procedimiento, permitiendo al diseñador inexperto tener un criterio de ayuda para la creación del portafolio de productos. La variabilidad es el producto de las desviaciones estándar de las variables de respuesta, se puede interpretar como una medida de la cobertura del mercado para una configuración de diseño.

Si se quiere abarcar un rango de valores o tamaños a ofertar, se recomienda aplicar los principios de arquitectura de productos de escalamiento y apilamiento como opciones importantes de desarrollo. En el caso desarrollado se pudo parametrizar la altura en términos del número de módulos, los cuales se repiten en todo el portafolio.

El tiempo de cálculo empleado en el método de Williams es del orden de 40 veces mayor al propuesto, debido a las repetitivas búsquedas y generación de familias alternativas de productos, además, que se debe hacer una ejecución del algoritmo para cada delta de las variables de diseño.

Las dos metodologías se basan en heurística, la diferencia radica en la forma en que se realiza la optimización, Williams optimiza la familia generada después que

ha creado todo el portafolio, en la metodología propuesta se aplica la posible solución más cercana²⁹ lo cual facilita y disminuye los tiempos de ejecución.

Se comprobó que el método propuesto es más sensible a las variaciones propias de los escenarios de demanda que el método de Williams. En los indicadores propuestos el método de Williams obtuvo comportamientos similares como se observa en las gráficas de resultados.

La mayor sensibilidad mostrada en el método propuesto representa una mayor facilidad de adaptarse, con un mismo portafolio, a varios tipos de escenarios de demanda. Es decir, que el portafolio responde más ajustadamente a los distintos tipos de escenarios.

La metodología propuesta, al emplear la variabilidad como criterio de valoración, permite obtener los "Productos Estrella" del portafolio, es decir los productos con mayores beneficios son fácilmente identificados por el algoritmo.

Para aplicar la metodología de Williams se debe tener mayor entendimiento de las capacidades del producto, y poder definir desde el inicio del proceso de diseño, cuál de las variables tiene mayor jerarquía.

Una familia de productos se puede escalar cuando las capacidades del producto varían de forma conocida en el grupo de tamaños que se quiere ofertar. En el caso de los silos la ecuación de la resistencia tiene validez en los rangos de diseño analizados.

²⁹ RUSSELL J.Stuart, NORVIG Peter [et al.]. "Artificial intelligence: a modern approach. 2 ed. Prentice Hall/Pearson Education, 2003. 1043 pag.

6. RECOMENDACIONES

Se sugiere emprender un conjunto de trabajos para complementar el estudio realizado en los siguientes aspectos:

Aplicar otros principios de arquitectura de productos como modo de manejo de la variedad, tales como estrechamiento; en el caso de hacer ajustes en las variables diámetro y altura. Y el de modularidad de componentes compartidos; para explorar la interacción de los silos con otros componentes.

Obtener una función de ganancia por medio de regresión sobre datos reales de las empresas del sector.

Evaluar la incidencia sobre la eficiencia de los portafolios obtenidos con las dos metodologías cuando se utilizan particiones enteras de los tamaños estándares de lámina. Es decir que se utilicen módulos de fracciones enteras del tamaño, de manera que se puedan generar más tamaños de silos intermedios.

Evaluar la efectividad de la metodología desarrollada cuando es aplicada a otro tipo de productos comúnmente ofrecidos por el sector metalmecánico.

Evaluar comparativamente la búsqueda de silos con un método de optimización diferente como el de algoritmos genéticos o colonia de hormigas, de manera que se compare la heurística aplicada frente a métodos de metaheurística.

7. TRABAJOS FUTUROS

Luego de realizar esta investigación, se vislumbran nuevos aspectos que complementarían el trabajo iniciado

Verificar la compatibilidad, interacción o sincronía de los portafolios obtenidos con la gama de productos asociada a los silos metálicos.

Aplicar el método propuesto teniendo presente la interacción con los accesorios de los silos que no fueron analizados, para definir principios aplicables al concepto de gama de producto.

Explorar el concepto de producto estratégico al analizar los productos que hacen parte de la gama en silos metálicos u otros productos metalmecánicos.

Comentado [PSU29]: Porque no se considero algunos de los accesorios básicos durante esta investigación?

Cual seria el impacto de la inclusión de estos elementos en los resultados aquí planteados?

Alguna hipótesis al respecto que quede como fundamento para trabajos futuros?

8. BIBLIOGRAFÍA

CARONE, M. J., WILLIAMS C. B, ALLEN J. K and MISTREE F. "An Application of Constructal Theory in the Multi-Objective Design of Product Platforms," Proceedings of the 2003 ASME *Design Theory and Methodology Conferences*, Chicago. 2003.

COLL R. Judit, RIBA R. Carles. Análisis y Caracterización De Arquitecturas De Productos Innovadores UPC, Barcelona, 2003.

DAHMUS, Jeffrey B.; GONZALEZ-ZUGASTI, Javier P. and OTTO, Kevin N. Modular product architecture. En: ASME Design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference. (sep. 2000); p. 1-11.

DAI, Zhihuang and SCOTT, Michael J. Product platform design through sensitivity analysis and cluster analysis. En: Department of Mechanical & Industrial Engineering. (mar. 2005); p. 1-29.

DIETMAR. Empresa diseñadora de sistemas de almacenamiento. Disponible en Internet [23/02/2008] <http://www.dietmar-schulze.de/spannepr.html>

DU, Xuehong; JIAO, Jianxin & TSENG, Mitchell M. Architecture of Product Family: Fundamentals and Metodology. En: Concurrent Engineering: Research and application. Vol 9, No 4 (2001); p.1-32.

DE WECK, Olivier L. and SUK SUHY, Eun. Product family strategy and platform design optimization. En: ASME Design Engineering Technical Conferences, Massachusetts Institute of Technology. (sep. 2003); p. 1-11.

DOHOGNE. Fabricante de silos modulares. Disponible en Internet [23/11/2007] www.DOHOGNE.COM

EGGEN, Oystein. Modular product development: A review of modularization objectives as well as techniques for identifying modular product architectures, presented in a unified model. En: Department of Product Design, Norwegian University of Science and Technology. (2003); p. 1-12.

FARRELL, Ronald S. and SIMPSON, Timothy W. Product platform design to improve commonality in custom products. En: Journal of intelligent manufacturing. (ago. 2003); p. 1-18.

FIXSON, Sebastian K. The multiple faces of modularity: a literature analysis of a product concept for assembled hardware products. En: Technical Report University of Michigan Industrial and Operations Engineering. (jun. 2003); p. 1-88.

JIAO, Jianxin. SIMPSON, Timothy W. SIDDIQUE, Zahed. "Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review". Journal of Intelligent Manufacturing, (2007). Vol 18, No 5–29.

HERNADEZ, Gabriel. ALLEN, Janet. Platform Design For Customizable Products As A Problem Of Access In A Geometric Space. *Eng. Opt.*, (2003); . p. 229–254.

HÖLTTÄ-OTTO, Katja. Modular product platform design. 2005, 65 p. Tesis Doctoral. Helsinki University of Technology, Laboratory of Machine Design.

KRISHNAPILLAI, Rajeew and ZEID, ABE. Mapping product design specification for mass customization. En: Journal of intelligent manufacturing. (2006); p. 1-15.

KUMAR, Deepak; CHEN, Wei and SIMPSON, Timothy W. A market-driven approach to product family design. En: Department of mechanical engineering, Northwestern University. (2007); p. 1-39.

KUMAR, Rupesh and ALLADA, Venkat. Scalable platforms using ant colony optimization. Journal of Intelligent Manufacturing (2007) 18:127–142. DOI 10.1007/s10845-007-0009-9

ORTIZ, Carlos A, en Tesis: "Modelado del ciclo de vida del producto del sector metalmecánico de Barranquilla, orientado a las empresas con potencial para la aplicación de la ingeniería concurrente". Uninorte 2001.

OTTO, Kevin.; WOOD, Kristin. Product Design. Thecniques in Reverse Engineering and New product Development, Prentice Hall, New Jersey, (2001), 620 p. ISBN 0-13-021271-7.

PAHL G.; BEITZ W, et all. "Engineering Design: a Systematic Aproach". Third Edition, Springer, London. (2007). 617 p. ISBN 978-1-84628-318-5.

PARK, Jaeil and TIMOTHY W., Simpson. Development of a production cost estimation framework for product family design. En: ASME International design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference. (sep-oct. 2004); p. 1-10.

RIBA R., Carles. Diseño Concurrente. Ediciones UPC, Barcelona, (2002). 226 p, 84-8301-598-6.

RIBA, Carles and MOLINA, Arturo. Ingeniería concurrente. Una metodología integradora. Barcelona: UPC, (2006). 314 p.

RUSSELL J.Stuart, NORVIG Peter [et al.]. "Artificial intelligence : a modern approach. 2 ed. Prentice Hall/Pearson Education, (2003). 1043 pag.

SCAFCO. Fabricante de silos. Disponible en Internet [23/11/2007]. <http://www.scafco.com/spanish/grain/ManualsAndDrawings.html>

SCHULZE, D. Powders and Bulks solids. Behavior, Characterization, Storage and Flow. Springer, New York. (2008), 512 p. ISBN 978-3-540-73767-4.

SIMEZA. Fabricante de Silos para Granos. Disponible en Internet [22/11/2007] <http://www.simeza.com/product3.html>

SIMPSON T. W. Product platform design and customization: Status and promise. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. (2004), 18 – p. 3-20.

SIMPSON, Timothy. Cursos de Diseño de product. Disponible en Internet [25/02/2008] <http://www.mne.psu.edu/simpson/courses/me579/syllabus.html>

STONE, Robert B. and VAN WIE, Michael. Examination of platform and differentiating elements in product design. En: FINAL Submission to journal of intelligent manufacturing. (2004); p. 1-27.

STONE, Robert, WOOD, Kristin. "A Heuristic Method For Identifying Modules For Product Architectures". University of Texas at Austin. (1999). 25 p.

SUK SUH, Eun. "Flexibe Product Plataforms" Phd Dissertation. Massachusetts Institute Of Technology. (2005). p. 191.

ULLRICH, K, EPPINGER S. "Product Design and Development". 3 ed. Mc Graw Hill, New York. (2004). 366 p. ISBN 0-07-247146-8

WILLIAMS, Christopher; ALLEN, Janet; ROSEN, David and MISTREE, Farrokh. Designing platforms for customizable products in markets with non-uniform demand. En: ASME Design engineering technical conferences and computer and information in engineering conference. (sep. 2004); p. 1-13.

ZHIHUANG, Dai. Scott, Michael. "Product Platform Design Through Sensitivity Analysis and Cluster Analysis". University of Illinois at Chicago, Department of Mechanical & Industrial Engineering, (2005), p 29.

ANEXOS

Anexo 1. Pesos específicos generalmente utilizados para el diseño de silos.

	Producto	Peso esp. N/m ³
1	Salvado	2940
2	Turba Seca Suelta	3136
3	Semilla de Algodón	3920
4	Avena	4116
5	Carbón Coque Refinador	5880
6	Cebada	5978
7	Nitrato de Amonio	7056
8	Turba Seca Sólida	7350
9	Alumbre Pulverizada	7448
10	Maní sin Cáscara	7546
11	Carbón Bituminoso	7840
12	Alumbre (Rocas)	8624
13	Antracita	8820
14	Bauxita (Mineral de Aluminio)	8869
15	Azúcar Refinada	9016
16	Fertilizante Fosfato Ácido	9408
17	Arcilla Seca	10780
18	Sulfato de Amonio Seco	10976
19	Sal Granulada	11760
20	Polvo de Caliza	12152
21	Sulfato de Amonio Húmedo	12544
22	Asfalto	13181
23	Grava (Lavada y Tamizada)	13328
24	Sílex	13524
25	Clínker	13720
26	Yeso	14112
27	Caliza (Terrones 50-70 mm)	14504
28	Cemento Portland Seco	14700

Fuente: Manual de diseño de Bandas Transportadoras. Bridgestone. 61 p.

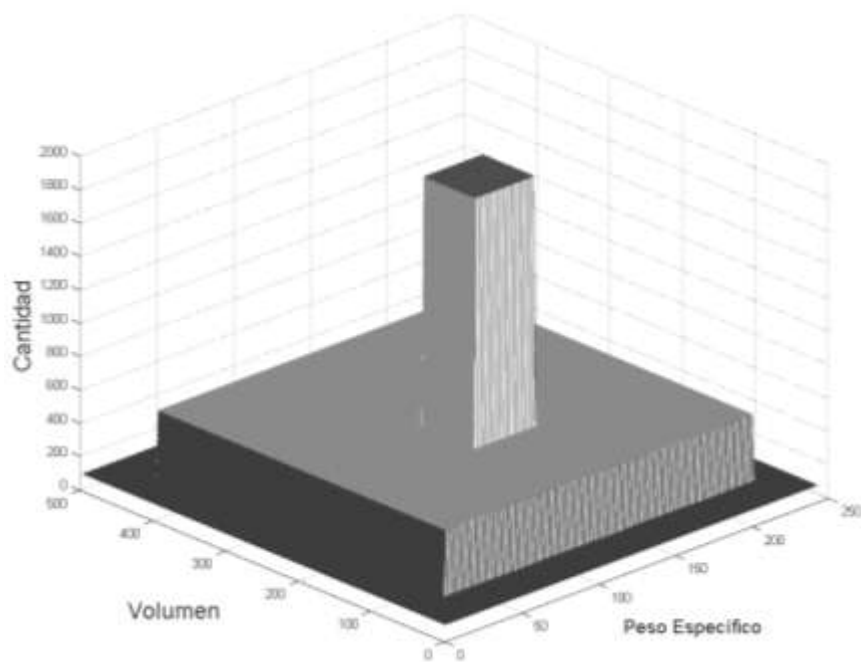
Anexo 2. Capacidades y dimensiones de silos según Fabricante SCAFCO.

MODELO DE SILO	DIAMETRO (PIES) (METROS)		ALTURA TOTAL (PIES) (METROS)		VOLUMEN CAPACIDAD (PIES CUBICOS) (METROS CUBICOS)		BUSHELs +5% COMPACTACION*	@ 770 KG/M3 ³ COMPACTACION*
SILOS TOLVA DE 60° - DESCARGA CENTRAL								
6601HBT	6'	1.83	12' 1"	3.68	164	4.6	132	3.6
6602HBT	6'	1.83	15' 7"	4.76	263	7.5	212	5.7
6603HBT	6'	1.83	19' 2"	5.84	363	10.3	291	7.9
6604HBT	6'	1.83	22' 9"	6.93	462	13.1	371	10.1
9601HBT	9'	2.74	15' 7"	4.74	439	12.4	353	9.6
9602HBT	9'	2.74	19' 1"	5.82	663	18.8	533	14.4
9603HBT	9'	2.74	22' 8"	6.91	887	25.1	713	19.3
9604HBT	9'	2.74	26' 3"	7.99	1,111	31.5	893	24.2
9605HBT	9'	2.74	29' 9"	9.07	1,335	37.8	1,072	29.1
9606HBT	9'	2.74	33' 4"	10.16	1,558	44.1	1,252	33.9
1201HBT-60	12'	3.66	19' 1"	5.82	907	25.7	729	19.8
1202HBT-60	12'	3.66	22' 8"	6.90	1,305	37.0	1,049	28.4
1203HBT-60	12'	3.66	26' 2"	7.99	1,703	48.2	1,368	37.1
1204HBT-60	12'	3.66	29' 9"	9.07	2,101	59.5	1,688	45.7
1205HBT-60	12'	3.66	33' 4"	10.15	2,499	70.8	2,008	54.4
1501HBT-60	15'	4.57	22' 7"	6.89	1,612	45.7	1,296	35.1
1502HBT-60	15'	4.57	26' 2"	7.97	2,234	63.3	1,795	48.6
1503HBT-60	15'	4.57	29' 9"	9.06	2,856	80.9	2,295	62.2
1504HBT-60	15'	4.57	33' 3"	10.14	3,478	98.5	2,794	75.7
1505HBT-60	15'	4.57	36' 10"	11.23	4,099	116.1	3,294	89.3
1506HBT-60	15'	4.57	40' 5"	12.31	4,721	133.7	3,794	102.8
1507SHBT-60	15'	4.57	44' 1"	13.44	5,343	151.3	4,508	122.1
1508SHBT-60**	15'	4.57	47' 8"	14.53	5,964	168.9	5,032	136.4
1509SHBT-60**	15'	4.57	51' 3"	15.61	6,586	186.5	5,557	150.6
1510SHBT-60**	15'	4.57	54' 9"	16.70	7,208	204.1	6,081	164.8
1511SHBT-60**	15'	4.57	59' 3"	18.05	7,985	226.1	6,737	182.5
1512SHBT-60**	15'	4.57	61' 11"	18.86	8,451	239.3	7,131	193.2
1514SHBT-60**	15'	4.57	67' 0"	20.42	9,345	264.6	7,885	213.6
1804SHBT-60**	18'	5.49	36' 11"	11.24	5,291	149.8	4,464	121.0
1805SHBT-60**	18'	5.49	40' 5"	12.33	6,186	175.2	5,220	141.4
1806SHBT-60**	18'	5.49	44' 0"	13.41	7,082	200.5	5,975	161.9
1807SHBT-60**	18'	5.49	47' 7"	14.50	7,977	225.9	6,730	182.4
1808SHBT-60**	18'	5.49	51' 7"	15.72	8,990	254.6	7,586	205.5
1809SHBT-60**	18'	5.49	55' 2"	16.81	9,886	279.9	8,341	226.0
1810SHBT-60**	18'	5.49	58' 8"	17.89	10,781	305.3	9,096	246.5
1811SHBT-60**	18'	5.49	63' 2"	19.25	11,900	337.0	10,041	272.0
1812SHBT-60**	18'	5.49	65' 10"	20.06	12,571	356.0	10,607	287.4
1814SHBT-60**	18'	5.49	70' 11"	21.62	13,858	392.4	11,693	316.8
2104SHBT-60**	21'	6.40	40' 4"	12.29	7,588	214.9	6,402	173.5
2105SHBT-60**	21'	6.40	43' 11"	13.38	8,806	249.4	7,430	201.3
2106SHBT-60**	21'	6.40	47' 5"	14.46	10,025	283.9	8,458	229.2

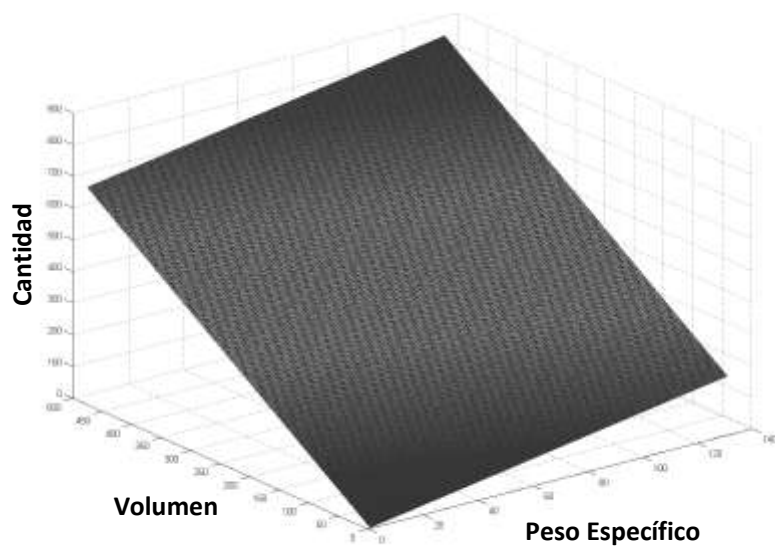
Anexo 3. Capacidades y dimensiones de silos según Fabricante DOHOGNE.

Øm H/m	7,41	8,03	8,65	9,28	11,15	13,01	14,87	16,73	18,59	20,45
7,52	320									
8,44	340	430	500							
8,40	400	470	550	700	950					
10,34	450	500	600	800	1000	1400				
11,28	500	550	650	850	1100	1500				
12,22	530	600	700	950	1200	1400				
13,16	570	650	1000	1300	1800	2300				
14,10	600	700	850	1150	1400	1900	2500			
15,04	650	750	900	1150	1500	2000	2650			
15,98	700	800	950	1200	1600	2150	2850			
16,92	730	850	1000	1300	1700	2300	3000	3800		
17,86	770	900	1050	1350	1800	2400	3150	4000		
18,80	800	950	1100	1450	1850	2550	3350	4200	5000	
19,74	850	1000	1150	1500	1950	2700	3500	4450	5450	
20,68	900	1050	1200	1600	2000	2800	3650	5000	6000	7000

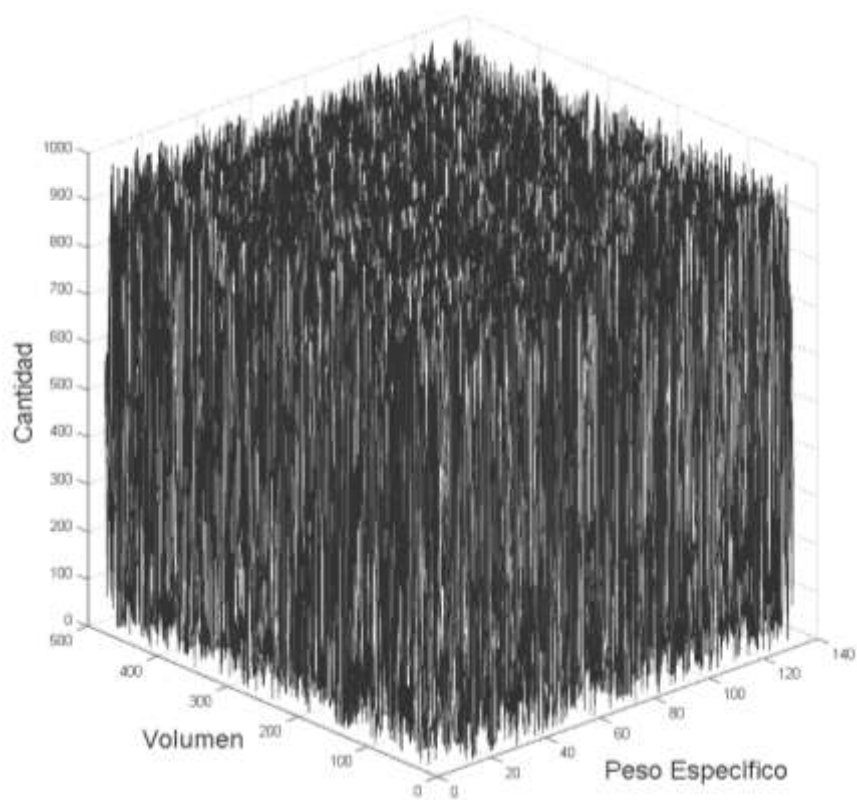
Anexo 4. Gráfica de Escenario de Demanda Puntual



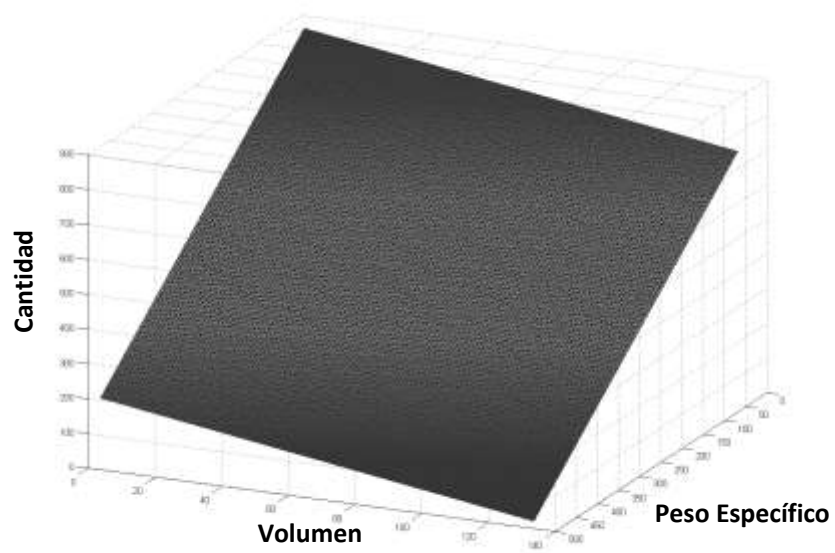
Anexo 5. Gráfica de Escenario de Demanda Lineal Positiva.



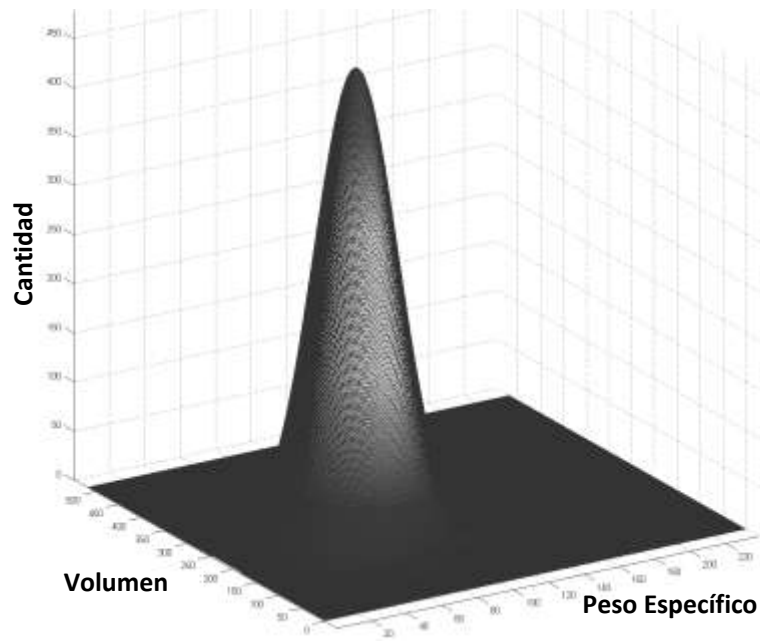
Anexo 6. Gráfica de Escenario de Demanda Aleatoria.



Anexo 7. Gráfica de Escenario de Demanda Lineal Negativa.



Anexo 8. Gráfica de Escenario de Demanda Gaussiana



Anexo 9. Código Fuente del Algoritmo en la metodología propuesta.

```
'definicion explicita de variables
Option Explicit

'declaracion de variables publicas
Dim AnchoLamina As Double, AltoLamina As Double, ResistenciaUltima As Double
Dim FactorSeguridad As Double, EsbeltezMenor As Double, EsbeltezMayor As Double
Dim NumeroModulos As Long, LaminasModulo As Long
Dim Esbeltez As Double, Volumen As Double
Dim pSilos As Long, pSilosPrev As Long, pSilosMax As Long
Dim GuardarCache(65536) As Double
Dim JerarquiaEspesores As Double, JerarquiaModulos As Long, JerarquiaLaminas As Long

Sub ProcesoCompleto()

    'ejecutar el proceso completo
    Call CrearEspacioRestringido
    Call EliminarPesoEspecifico
    Call CalcularGanancia
    Call CalcularJerarquias
    Call CrearPortafolio

End Sub

Sub CrearEspacioRestringido()

    'limpiar la hoja de espacio restringido
    Call BorrarCeldas("Espacio Restringido", "A4", "IV65536")

    'crear el espacio de fabricacion
    'dimensionar las variables
    Dim pEspesores As Long, pModulos As Long, pLaminas As Long
    Dim pEspesoresMax As Long, pModulosMax As Long, pLaminasMax As Long

    'leer variables de la hoja silos
    AnchoLamina = 0.3048 * hSilos.Range("D4").Value
    AltoLamina = 0.3048 * hSilos.Range("E4").Value
    ResistenciaUltima = hSilos.Range("F4").Value
    pEspesoresMax = UltimaFila("Silos", "G", 4)
    pModulosMax = UltimaFila("Silos", "H", 4)
    pLaminasMax = UltimaFila("Silos", "I", 4)
    FactorSeguridad = hSilos.Range("K4").Value
    EsbeltezMenor = hSilos.Range("L4").Value
    EsbeltezMayor = hSilos.Range("M4").Value

    'crear cada uno de los silos
    'primero por modulo, luego laminas, luego espesores
    pSilos = 4
    For pModulos = 4 To pModulosMax
        NumeroModulos = hSilos.Cells(pModulos, "H")
        For pLaminas = 4 To pLaminasMax
            LaminasModulo = hSilos.Cells(pLaminas, "I")

            'calcular si la esbeltez cumple con la restricción
            Esbeltez = (3.1416 * AltoLamina * NumeroModulos) / (AnchoLamina * LaminasModulo)
            If (EsbeltezMenor <= Esbeltez) And (Esbeltez <= EsbeltezMayor) Then
                'escribir los modulos del silo
                Call CrearSilo(pEspesoresMax, 1)
            End If
        Next pLaminas
    Next pModulos

    'calcular el peso específico
    Call CalcularPesoEspecifico

    'calcular el costo del silo
    Call CalcularCosto

    'calcular el precio de venta
    Call CalcularPrecioVenta

End Sub

Sub BorrarHoja(Hoja As String)

    'borra la hoja indicada
    Worksheets(Hoja).Range("A1:IV65536") = ""

End Sub

Sub BorrarCeldas(Hoja As String, Inicio As String, Fin As String)

    'borra las celdas indicadas
    Worksheets(Hoja).Range(Inicio & ":" & Fin) = ""

End Sub
```

```

Function UltimaFila(Hoja As String, Columna As String, Inicio As Long) As Long

'busca la ultima fila distinta a vacio
Dim y As Long
For y = Inicio To 65536
    If Worksheets(Hoja).Cells(y, Columna) <> "" Then
        UltimaFila = y
    Else
        Exit For
    End If
Next y

End Function

Sub CrearSilo(Maximo As Long, Posicion As Long)

'probar si la posicion no es la final
If Posicion <= NumeroModulos Then
    Dim i As Long
    For i = 4 To Maximo
        Call CopiarPosicion(Posicion)
        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, Posicion + 9) = hSilos.Cells(i, "G")
        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, Posicion + 9).Interior.Color = hSilos.Cells(i, "G").Interior.Color
        GuardarCache(Posicion) = hSilos.Cells(i, "G")
        Call CrearSilo(i, Posicion + 1)
    Next i
Else
    'escribir los datos restantes y pasar al siguiente
    hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "B") = NumeroModulos
    hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "C") = LaminasModulo
    hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "D") = NumeroModulos * LaminasModulo
    Volumen = (AltoLamina * AnchoLamina * AnchoLamina * NumeroModulos * LaminasModulo * LaminasModulo) / (4 * 3.1416)
    hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "E") = Volumen
    pSilos = pSilos + 1
End If

End Sub

Sub CopiarPosicion(Posicion As Long)

'utilizar los datos en la cache para repetir los modulos
Dim i As Long
If Not pSilosPrev = pSilos Then
    For i = 10 To 9 + Posicion - 1
        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i) = GuardarCache(i - 9)
        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i).Interior.Color = hEspacioRestringido.Cells(pSilos - 1, i).Interior.Color
    Next i
    pSilosPrev = pSilos
End If

End Sub

Sub CalcularPesoEspecifico()

'calcular el peso especifico por cada modulo
'asignarle al silo el peso especifico minimo hallado
Dim i As Long
Dim Espesor As Double
Dim PesoEspecifico As Double, MenorPesoEspecifico As Double
pSilosMax = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
For pSilos = 4 To pSilosMax
    NumeroModulos = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "B")
    LaminasModulo = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "C")
    MenorPesoEspecifico = 999999999
    For i = 10 To 10 + NumeroModulos - 1
        Espesor = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i) * 0.0254
        PesoEspecifico = (2 * 3.1416 * Espesor * ResistenciaUltima) / ((10 + NumeroModulos - i) * AltoLamina * AnchoLamina * LaminasModulo *
FactorSeguridad)
        If PesoEspecifico < MenorPesoEspecifico Then
            MenorPesoEspecifico = PesoEspecifico
        End If
    Next i
    hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "F") = MenorPesoEspecifico
Next pSilos

End Sub

Sub CalcularCosto()

'calcular el costo de cada silo
Dim i As Long
Dim Espesor As Double
Dim MetroSoldadura As Double, Rolado As Double
pSilosMax = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
For pSilos = 4 To pSilosMax
    Volumen = 0
    Rolado = 0
    NumeroModulos = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "B")
    LaminasModulo = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "C")

```

```

For i = 10 To 19
    Espesor = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i) * 0.0254
    Rolado = Rolado + Espesor
    Volumen = Volumen + (AltoLamina * AnchoLamina * LaminasModulo * Espesor)
Next i
Volumen = hSilos.Range("O4").Value * Volumen
MetroSoldadura = hSilos.Range("P4").Value * ((NumeroModulos * AltoLamina * LaminasModulo) + ((NumeroModulos - 1) * LaminasModulo * AnchoLamina))
Rolado = hSilos.Range("Q4").Value * Volumen * (Rolado / LaminasModulo)
hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "G") = Volumen + MetroSoldadura + Rolado
Next pSilos

End Sub

Sub CalcularPrecioVenta()

'calcular el precio de venta
pSilosMax = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
For pSilos = 4 To pSilosMax
    hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "H") = 1.3 * hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "G")
Next pSilos

End Sub

Sub EliminarPesoEspecifico()

'eliminar silos si su capacidad de peso especifico
'se cumple con otra configuracion de igual volumen
'pero mas económica
Dim i As Long
Dim PesoEspecifico As Double, MayorPesoEspecifico As Double
Dim VolumenMayor As Double

pSilos = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
Do
    MayorPesoEspecifico = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "F")
    VolumenMayor = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "E")
    For i = (pSilos - 1) To 4 Step -1
        PesoEspecifico = hEspacioRestringido.Cells(i, "F")
        Volumen = hEspacioRestringido.Cells(i, "E")

        If (PesoEspecifico >= MayorPesoEspecifico) And (VolumenMayor = Volumen) Then
            hEspacioRestringido.Rows(pSilos).Delete
            Exit For
        End If
    Next
    pSilos = pSilos - 1
Loop Until pSilos = 5

'pintar de blanco las celdas vacias luego de la operacion
pSilos = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
Do
    For i = 10 To 19
        If hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i) = "" Then
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i).Interior.Color = vbWhite
        End If
    Next i
    pSilos = pSilos - 1
Loop Until pSilos = 4

End Sub

Sub CalcularGanancia()

'calcular la ganancia esperada
Dim xDemanda As Long, yDemanda As Long, yDemandaMax As Long
Dim PesoEspecifico As Double
Dim VolumenMin As Double, VolumenMax As Double

pSilosMax = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
yDemandaMax = UltimaFila("Demanda", "A", 1)

'organizar por volumen y peso especifico
hEspacioRestringido.Range("B4:S" & CStr(pSilosMax)).Sort Key1:=hEspacioRestringido.Range("E4"), Order1:=xlAscending,
Key2:=hEspacioRestringido.Range("F4"), Order2:=xlAscending

For yDemanda = 2 To yDemandaMax
    For xDemanda = 2 To 245
        If hDemanda.Cells(yDemanda, xDemanda).Value = "" Then
            Else
                For pSilos = 4 To pSilosMax
                    Volumen = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "E")
                    VolumenMin = hDemanda.Cells(yDemanda, 1) * (1 - hSilos.Cells(4, "S").Value)
                    VolumenMax = hDemanda.Cells(yDemanda, 1) * (1 + hSilos.Cells(4, "T").Value)
                    PesoEspecifico = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "F")
                    If (Volumen >= VolumenMin) And (Volumen <= VolumenMax) And (PesoEspecifico >= hDemanda.Cells(1, xDemanda)) Then
                        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "I") = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "I") + hDemanda.Cells(yDemanda, xDemanda) *
                        (hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "H") - hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "G"))
                    End If
                Next pSilos
            End If
        End For
    Next yDemanda
End Sub

```



```

        End If
        Next pSilos
    End If
    Next xDemanda
    Next yDemanda

    Call EliminarGanancia

End Sub

Sub EliminarGanancia()

    'eliminar silos si su ganancia es <= 0
    Dim i As Long

    pSilosMax = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
    pSilos = 4
    Do
        If hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "I") <= 0 Then
            hEspacioRestringido.Rows(pSilos).Delete
            If hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "B") = "" Then
                Exit Do
            End If
        End If
        Else
            pSilos = pSilos + 1
        End If
    Loop Until pSilos = pSilosMax

    'pintar de blanco las celdas vacias luego de la operacion
    pSilos = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
    Do
        For i = 10 To 19
            If hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i) = "" Then
                hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i).Interior.Color = vbWhite
            End If
        Next i
        pSilos = pSilos - 1
    Loop Until pSilos = 4

End Sub

Sub CalcularJerarquias()

    'declarar las variables
    Dim i As Long, j As Long, UltimoEspesor As Long, UltimoNumero As Long, UltimoLamina As Long

    'limpiar los datos anteriores
    Call BorrarCeldas("Jerarquias", "B4", "M65536")
    Call BorrarCeldas("Jerarquias", "O2", "Q3")

    'leer los ultimos datos
    UltimoEspesor = UltimaFila("Silos", "G", 4)
    UltimoNumero = UltimaFila("Silos", "H", 4)
    UltimoLamina = UltimaFila("Silos", "I", 4)

    'quitar el autofiltro
    hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter

    'calcular la variabilidad por espesores
    For i = 4 To UltimoEspesor
        hJerarquia.Cells(i, "B") = hSilos.Cells(i, "G").Value
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "B").Value
        If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
            hJerarquia.Cells(i, "C") = hEspacioRestringido.Range("E2").Value
            hJerarquia.Cells(i, "D") = hEspacioRestringido.Range("F2").Value
        End If
    Next i
    hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter

    'calcular la variabilidad por numero de modulos
    For i = 4 To UltimoNumero
        hJerarquia.Cells(i, "F") = hSilos.Cells(i, "H")
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "F")
        If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
            hJerarquia.Cells(i, "G") = hEspacioRestringido.Range("E2").Value
            hJerarquia.Cells(i, "H") = hEspacioRestringido.Range("F2").Value
            hJerarquia.Cells(i, "I") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
        End If
    Next i
    hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter

    'calcular la variabilidad por numero de laminas
    For i = 4 To UltimoLamina
        hJerarquia.Cells(i, "J") = hSilos.Cells(i, "I")
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "J")
        If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
            hJerarquia.Cells(i, "K") = hEspacioRestringido.Range("E2").Value
            hJerarquia.Cells(i, "L") = hEspacioRestringido.Range("F2").Value
            hJerarquia.Cells(i, "M") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
        End If
    Next i

```

```

End If
Next i
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter

'calcular la 1ra jerarquia
Select Case hJerarquia.Cells(4, 15)
Case hJerarquia.Range("B2").Value
hJerarquia.Cells(2, 15).Value = hJerarquia.Range("B3").Value
For i = 4 To UltimoEspesor
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "B").Value
If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
hJerarquia.Cells(i, "E") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
End If
Next i
For j = 4 To UltimoEspesor
If hJerarquia.Range("E2").Value = hJerarquia.Cells(j, "E").Value Then
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "B").Value
hJerarquia.Cells(3, 15).Value = hJerarquia.Cells(j, "B").Value
Exit For
End If
Next j
Case hJerarquia.Range("F2").Value
hJerarquia.Cells(2, 15).Value = hJerarquia.Range("F3").Value
For i = 4 To UltimoNumero
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "F")
If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
hJerarquia.Cells(i, "I") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
End If
Next i
For j = 4 To UltimoNumero
If hJerarquia.Range("I2").Value = hJerarquia.Cells(j, "I").Value Then
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "F").Value
hJerarquia.Cells(3, 15).Value = hJerarquia.Cells(j, "F").Value
Exit For
End If
Next j
Case hJerarquia.Range("J2").Value
hJerarquia.Cells(2, 15).Value = hJerarquia.Range("J3").Value
For i = 4 To UltimoLamina
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "J")
If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
hJerarquia.Cells(i, "M") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
End If
Next i
For j = 4 To UltimoLamina
If hJerarquia.Range("M2").Value = hJerarquia.Cells(j, "M").Value Then
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "J").Value
hJerarquia.Cells(3, 15).Value = hJerarquia.Cells(j, "J").Value
Exit For
End If
Next j
End Select

'calcular la 2da jerarquia
Select Case hJerarquia.Cells(4, 16)
Case hJerarquia.Range("B2").Value
hJerarquia.Cells(2, 16).Value = hJerarquia.Range("B3").Value
For i = 4 To UltimoEspesor
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "B").Value
If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
hJerarquia.Cells(i, "E") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
End If
Next i
For j = 4 To UltimoEspesor
If hJerarquia.Range("E2").Value = hJerarquia.Cells(j, "E").Value Then
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "B").Value
hJerarquia.Cells(3, 16).Value = hJerarquia.Cells(j, "B").Value
Exit For
End If
Next j
Case hJerarquia.Range("F2").Value
hJerarquia.Cells(2, 16).Value = hJerarquia.Range("F3").Value
For i = 4 To UltimoNumero
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "F")
If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
hJerarquia.Cells(i, "I") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
End If
Next i
For j = 4 To UltimoNumero
If hJerarquia.Range("I2").Value = hJerarquia.Cells(j, "I").Value Then
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "F").Value
hJerarquia.Cells(3, 16).Value = hJerarquia.Cells(j, "F").Value
Exit For
End If
Next j
Case hJerarquia.Range("J2").Value
hJerarquia.Cells(2, 16).Value = hJerarquia.Range("J3").Value

```

```

For i = 4 To UltimoLamina
    hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "J")
    If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
        hJerarquia.Cells(i, "M") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
    End If
Next i
For j = 4 To UltimoLamina
    If hJerarquia.Range("M2").Value = hJerarquia.Cells(j, "M").Value Then
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "J").Value
        hJerarquia.Cells(3, 16).Value = hJerarquia.Cells(j, "J").Value
    Exit For
    End If
Next j
End Select

'calcular la 3ra jerarquia
Select Case hJerarquia.Cells(4, 17)
Case hJerarquia.Range("B2").Value
    hJerarquia.Cells(2, 17).Value = hJerarquia.Range("B3").Value
    For i = 4 To UltimoEspesor
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "B").Value
        If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
            hJerarquia.Cells(i, "E") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
        End If
    Next i
    For j = 4 To UltimoEspesor
        If hJerarquia.Range("E2").Value = hJerarquia.Cells(j, "E").Value Then
            hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "B").Value
            hJerarquia.Cells(3, 17).Value = hJerarquia.Cells(j, "B").Value
        Exit For
        End If
    Next j
Case hJerarquia.Range("F2").Value
    hJerarquia.Cells(2, 17).Value = hJerarquia.Range("F3").Value
    For i = 4 To UltimoNumero
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "F")
        If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
            hJerarquia.Cells(i, "I") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
        End If
    Next i
    For j = 4 To UltimoNumero
        If hJerarquia.Range("I2").Value = hJerarquia.Cells(j, "I").Value Then
            hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "F").Value
            hJerarquia.Cells(3, 17).Value = hJerarquia.Cells(j, "F").Value
        Exit For
        End If
    Next j
Case hJerarquia.Range("J2").Value
    hJerarquia.Cells(2, 17).Value = hJerarquia.Range("J3").Value
    For i = 4 To UltimoLamina
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=hJerarquia.Cells(i, "J")
        If (IsError(hEspacioRestringido.Range("E2").Value) = False) And (IsError(hEspacioRestringido.Range("F2").Value) = False) Then
            hJerarquia.Cells(i, "M") = hEspacioRestringido.Range("I2").Value
        End If
    Next i
    For j = 4 To UltimoLamina
        If hJerarquia.Range("M2").Value = hJerarquia.Cells(j, "M").Value Then
            hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=hJerarquia.Cells(j, "J").Value
            hJerarquia.Cells(3, 17).Value = hJerarquia.Cells(j, "J").Value
        Exit For
        End If
    Next j
End Select

'limpiar el autofiltro
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter

End Sub

Sub CrearPortafolio()
    'declarar las variables
    Dim i As Long, j As Long

    'limpiar la hoja de portafolio
    Call BorrarCeldas("Portafolio", "A4", "IV65536")

    'limpiar el autofiltro
    hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter

    'filtrar el portafolio
    Select Case hJerarquia.Cells(2, 15)
    Case hJerarquia.Range("B3")
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:="<=" & Str(hJerarquia.Range("O3"))
    Case hJerarquia.Range("F3")
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:="<=" & Str(hJerarquia.Range("O3"))
    Case hJerarquia.Range("J3")
        hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=Str(hJerarquia.Range("O3"))
    End Select

```

```

Select Case hJerarquia.Cells(2, 16)
Case hJerarquia.Range("B3")
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:="<=" & Str(hJerarquia.Range("P3"))
Case hJerarquia.Range("F3")
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:="<=" & Str(hJerarquia.Range("P3"))
Case hJerarquia.Range("J3")
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=Str(hJerarquia.Range("P3"))
End Select
Select Case hJerarquia.Cells(2, 17)
Case hJerarquia.Range("B3")
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=9, Criteria1:="<=" & Str(hJerarquia.Range("Q3"))
Case hJerarquia.Range("F3")
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:="<=" & Str(hJerarquia.Range("Q3"))
Case hJerarquia.Range("J3")
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=Str(hJerarquia.Range("Q3"))
End Select

'copiar los silos filtrados
hEspacioRestringido.Range("B4:S65536").Copy hPortafolio.Range("B4:S65536")

'limpiar el autofiltro
hEspacioRestringido.Range("B3:S65536").AutoFilter

End Sub

```

Anexo 10. Código Fuente del Algoritmo en la metodología de Williams.

```
'definicion explicita de variables
Option Explicit

'declaracion de variables publicas
Dim AnchoLamina As Double, AltoLamina As Double, ResistenciaUltima As Double
Dim FactorSeguridad As Double, EsbeltezMenor As Double, EsbeltezMayor As Double
Dim pSilos As Long

Sub ProcesoCompleto()

    'ejecutar el proceso completo
    hSilos.Range("B18").Value = ""
    hSilos.Range("B20").Value = ""
    hSilos.Range("B18").Value = Str(Date) & " " & Str(Time)

    Call ParticionarDemanda
    'Call CalcularGanancia
    'Call CalcularPortafolios
    hSilos.Range("B20").Value = Str(Date) & " " & Str(Time)

End Sub

Sub ParticionarDemanda()

    'limpiar la hoja de espacio restringido
    hEspacioRestringido.Range("B3:U65536").AutoFilter
    Call BorrarCeldas("Espacio Restringido", "A4", "U65536")
    Call BorrarCeldas("Portafolio", "A4", "U65536")

    'crear el espacio de fabricacion
    'dimensionar las variables
    Dim pEspesores As Long
    Dim pEspesoresMax As Long

    'leer variables de la hoja silos
    AnchoLamina = 0.3048 * hSilos.Range("D4").Value
    AltoLamina = 0.3048 * hSilos.Range("E4").Value
    ResistenciaUltima = hSilos.Range("F4").Value
    pEspesoresMax = UltimaFila("Silos", "G", 4)
    FactorSeguridad = hSilos.Range("I4").Value
    EsbeltezMenor = hSilos.Range("J4").Value
    EsbeltezMayor = hSilos.Range("K4").Value

    'dimensionar la particion
    Dim pH As Long, DeltaH As Double
    Dim pD As Long, DeltaD As Double
    Dim pHMax As Long, pDMax As Long
    Dim Altura As Double, Diametro As Double
    pSilos = 4
    For pH = 1 To 9999
        DeltaH = hSilos.Range("W4").Value * pH
        If DeltaH > hSilos.Range("Y4").Value Then
            Exit For
        End If
        For pD = 1 To 9999
            DeltaD = hSilos.Range("V4").Value * pD
            If DeltaD > hSilos.Range("X4").Value Then
                Exit For
            End If
            For pHMax = 1 To 9999
                Altura = pHMax * DeltaH
                If Altura > hSilos.Range("Y4").Value Then
                    Exit For
                End If
                For pDMax = 1 To 9999
                    Diametro = pDMax * DeltaD
                    If Diametro > hSilos.Range("X4").Value Then
                        Exit For
                    End If
                    If (EsbeltezMenor <= (Altura / Diametro)) And ((Altura / Diametro) <= EsbeltezMayor) Then
                        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "B").Value = DeltaH
                        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "C").Value = DeltaD
                        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "D").Value = Altura
                        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "E").Value = Diametro
                        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "F").Value = (3.1416 * Diametro * Diametro * Altura) / 4
                        Call CalcularSilo(DeltaD, DeltaH, Altura, Diametro, (3.1416 * Diametro * Diametro * Altura) / 4)
                    End If
                Next pDMax
            Next pHMax
        Next pHMax
    Next pH
    'Debug.Print DeltaH; vbTab; DeltaD; vbTab; Altura; vbTab; Diametro; vbTab; pSilos
    If hEspacioRestringido.Range("K2").Value > 0 Then
        Call CalcularGanancia
        Call CalcularPortafolios
    End If
    Call BorrarCeldas("Espacio Restringido", "A4", "U65536")
    pSilos = 4
```

```

        Next pD
    Next pH

End Sub

Sub CalcularSilo(DeltaD As Double, DeltaH As Double, Altura As Double, Diametro As Double, Volumen As Double)

    'calcular las características del silo
    Dim NumeroModulos As Long, NumeroLaminas As Long
    Dim y As Long
    If (Altura / AltoLamina) = Int(Altura / AltoLamina) Then
        NumeroModulos = Altura / AltoLamina
    Else
        NumeroModulos = Int(Altura / AltoLamina) + 1
    End If
    If ((3.1416 * Diametro) / AnchoLamina) = Int((3.1416 * Diametro) / AnchoLamina) Then
        NumeroLaminas = (3.1416 * Diametro) / AnchoLamina
    Else
        NumeroLaminas = Int((3.1416 * Diametro) / AnchoLamina) + 1
    End If
    For y = 4 To 12004
        If (NumeroModulos = hPlantilla.Cells(y, "B").Value) And (NumeroLaminas = hPlantilla.Cells(y, "C").Value) Then
            If hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "B") = "" Then
                hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "B") = hEspacioRestringido.Cells(pSilos - 1, "B")
                hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "C") = hEspacioRestringido.Cells(pSilos - 1, "C")
                hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "D") = hEspacioRestringido.Cells(pSilos - 1, "D")
                hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "E") = hEspacioRestringido.Cells(pSilos - 1, "E")
                hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "F") = hEspacioRestringido.Cells(pSilos - 1, "F")
            End If
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "K").Value = hPlantilla.Cells(y, "G")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "L").Value = hPlantilla.Cells(y, "H")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "M").Value = hPlantilla.Cells(y, "I")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "N").Value = hPlantilla.Cells(y, "J")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "O").Value = hPlantilla.Cells(y, "K")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "P").Value = hPlantilla.Cells(y, "L")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "Q").Value = hPlantilla.Cells(y, "M")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "R").Value = hPlantilla.Cells(y, "N")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "S").Value = hPlantilla.Cells(y, "O")
            hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "T").Value = hPlantilla.Cells(y, "P")
            Call CalcularPesoEspecifico(Altura, Diametro, NumeroModulos)
            Call CalcularCosto(Altura, Diametro, NumeroModulos, NumeroLaminas)
            Call CalcularPrecioVenta
            pSilos = pSilos + 1
            If (NumeroModulos > hPlantilla.Cells(y + 1, "B").Value) Or (NumeroLaminas > hPlantilla.Cells(y + 1, "C").Value) Then
                Exit For
            End If
        Else
            If (NumeroModulos < hPlantilla.Cells(y, "B").Value) Then
                Exit For
            End If
        End If
    Next y
End Sub

Sub CalcularPesoEspecifico(Altura As Double, Diametro As Double, NumeroModulos As Long)

    'calcular el peso especifico por cada modulo
    'asignarle al silo el peso especifico minimo hallado
    Dim i As Long
    Dim Espesor As Double
    Dim PesoEspecifico As Double, MenorPesoEspecifico As Double

    MenorPesoEspecifico = 999999999
    For i = 11 To 11 + NumeroModulos - 1
        Espesor = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i) * 0.0254
        PesoEspecifico = (2 * 3.1416 * Espesor * ResistenciaUltima) / ((Altura - ((i - 11) * AltoLamina)) * Diametro * FactorSeguridad)
        If PesoEspecifico < MenorPesoEspecifico Then
            MenorPesoEspecifico = PesoEspecifico
        End If
    Next i
    hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "G") = MenorPesoEspecifico
End Sub

Sub CalcularCosto(Altura As Double, Diametro As Double, NumeroModulos As Long, NumeroLaminas As Long)

    'calcular el costo de cada silo
    Dim i As Long
    Dim Espesor As Double
    Dim MetroSoldadura As Double, Rolado As Double
    Dim Volumen As Double
    Dim Corte As Double, Desperdicio As Double
    Dim EspesoresAcumulados As Double

    Volumen = 0
    Rolado = 0
    EspesoresAcumulados = 0
    For i = 11 To 20
        Espesor = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i) * 0.0254
    Next i

```

```

Rolado = Rolado + Espesor
EspesoresAcumulados = EspesoresAcumulados + Espesor
If hEspacioRestringido.Cells(pSilos, i + 1) = "" Then
    Volumen = Volumen + ((Altura - ((i - 11) * AltoLamina)) * Espesor * 3.1416 * Diametro)
Exit For
Else
    Volumen = Volumen + (AltoLamina * Diametro * 3.1416 * Espesor)
End If
Next i
Volumen = hSilos.Range("M4").Value * Volumen
MetroSoldadura = hSilos.Range("N4").Value * ((Altura * NumeroLaminas) + ((NumeroModulos - 1) * Diametro * 3.1416))
Rolado = hSilos.Range("O4").Value * Volumen * (Rolado / NumeroLaminas)
If NumeroModulos <> (Altura / AltoLamina) Then
    Corte = (3.1416 * Diametro)
    Desperdicio = ((NumeroModulos * AltoLamina) - Altura) * Espesor * 3.1416 * Diametro
End If
If NumeroLaminas <> ((3.1416 * Diametro) / AnchoLamina) Then
    Corte = Corte + Altura
    Desperdicio = Desperdicio + (((NumeroLaminas * AnchoLamina) - (3.1416 * Diametro)) * (NumeroModulos * AltoLamina) * (EspesoresAcumulados))
End If
Corte = hSilos.Range("P4").Value * Corte
Desperdicio = hSilos.Range("Q4").Value * Desperdicio
hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "H") = Volumen + MetroSoldadura + Rolado + Corte + Desperdicio

End Sub

Sub CalcularPrecioVenta()

    'calcular el precio de venta
    hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "I") = 1.3 * hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "H")

End Sub

Sub CalcularGanancia()

    'hSilos.Range("B18").Value = ""
    'hSilos.Range("B20").Value = ""

    'calcular la ganancia esperada
    Dim xDemanda As Long, yDemandaMax As Long, xDemandaMax As Long
    Dim PesoEspecifico As Double
    Dim VolumenMin As Double, VolumenMax As Double, Volumen As Double
    Dim pSilosMax As Long
    Dim DemandaAsignada As Boolean
    Dim pSilosMin As Long

    pSilosMax = UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 3)
    yDemandaMax = UltimaFila("Demanda", "A", 1)
    xDemandaMax = UltimaColumna("Demanda", 1, 1)

    'organizar por deltaD y deltaH y costo
    hEspacioRestringido.Range("B4:S" & CStr(pSilosMax)).Sort Key1:=hEspacioRestringido.Range("F4"), Order1:=xlAscending,
    Key2:=hEspacioRestringido.Range("G4"), Order2:=xlAscending, Key3:=hEspacioRestringido.Range("H4"), Order3:=xlAscending

    pSilos = 4
    For yDemanda = 2 To yDemandaMax
        For xDemanda = 2 To xDemandaMax
            If hDemanda.Cells(yDemanda, xDemanda).Value = "" Then
                Else
                    DemandaAsignada = False
                    Volumen = hEspacioRestringido.Cells(4, "F").Value
                    VolumenMin = hDemanda.Cells(yDemanda, 1) * (1 - hSilos.Cells(4, "S").Value)
                    VolumenMax = hDemanda.Cells(yDemanda, 1) * (1 + hSilos.Cells(4, "T").Value)
                    PesoEspecifico = hEspacioRestringido.Cells(4, "G").Value
                    'If (Volumen >= VolumenMin) And (Volumen <= VolumenMax) And (PesoEspecifico >= hDemanda.Cells(1, xDemanda)) Then
                        ' hEspacioRestringido.Cells(4, "J") = hEspacioRestringido.Cells(4, "J") + hDemanda.Cells(yDemanda, xDemanda) * (hEspacioRestringido.Cells(4,
                        "I") - hEspacioRestringido.Cells(4, "H"))
                        DemandaAsignada = True
                    End If
                    pSilosMin = BuscarSilo(yDemanda)
                    For pSilos = pSilosMin To pSilosMax
                        'If DemandaAsignada = True Then
                            ' If (hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "B").Value <> hEspacioRestringido.Cells(pSilos - 1, "B").Value) Or (hEspacioRestringido.Cells(pSilos,
                            "C").Value <> hEspacioRestringido.Cells(pSilos - 1, "C").Value) Then
                                DemandaAsignada = False
                            End If
                        End If
                        'If DemandaAsignada = False Then
                            Volumen = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "F").Value
                            VolumenMin = hDemanda.Cells(yDemanda, 1) * (1 - hSilos.Cells(4, "S").Value)
                            VolumenMax = hDemanda.Cells(yDemanda, 1) * (1 + hSilos.Cells(4, "T").Value)
                            PesoEspecifico = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "G").Value
                            If (Volumen >= VolumenMin) Then
                                If (Volumen <= VolumenMax) Then
                                    If (PesoEspecifico >= hDemanda.Cells(1, xDemanda)) Then
                                        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "J") = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "J") + hDemanda.Cells(yDemanda, xDemanda) *
                                        (hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "I") - hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "H"))
                                        hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "U") = hEspacioRestringido.Cells(pSilos, "U") + 1
                                    Exit For
                                End If
                            End If
                        End If
                    End For
                End If
            End For
        End For
    End Sub

```

```

        'DemandaAsignada = True
    End If
Else
    Exit For
End If
End If
End If
Next pSilos

End If
Next xDemanda
Next yDemanda

'hSilos.Range("B20").Value = Str(Date) & " " & Str(Time)

End Sub

Function BuscarSilo(yDemanda As Long) As Long

    Dim Volumen As Double, VolumenMin As Double
    Dim y As Long

    For y = pSilos To 4 Step -1
        Volumen = hEspacioRestringido.Cells(y, "F").Value
        VolumenMin = hDemanda.Cells(yDemanda, 1) * (1 - hSilos.Cells(4, "S").Value)
        If (Volumen < VolumenMin) Then
            Exit For
        End If
    Next y
    If y < 4 Then
        BuscarSilo = 4
    Exit Function
    Else
        BuscarSilo = y
    End If
End Function

Sub CalcularPortafolios()

    'dimensionar las variables
    Dim pH As Long, DeltaH As Double
    Dim pD As Long, DeltaD As Double
    Dim pHMax As Long, pDMax As Long

    'limpiar la hoja de portafolio
    'Call BorrarCeldas("Portafolio", "A4", "IV65536")
    'pDMax = hEspacioRestringido.Cells(UltimaFila("Espacio Restringido", "B", 4) - 1, "B")
    'pHMax = hEspacioRestringido.Cells(UltimaFila("Espacio Restringido", "C", 4) - 1, "C")

    'pSilos = 4
    pSilos = UltimaFila("Portafolio", "B", 3) + 1
    'revisar cada combinacion de particion generada
    hEspacioRestringido.Range("B3:U65536").AutoFilter
    For pH = 1 To pHMax
        ' DeltaH = hSilos.Range("W4").Value * pH
        ' If DeltaH > hDemanda.Cells(UltimaFila("Demanda", "A", 2) - 1, 1).Value Then
            ' Exit For
        ' End If
        For pD = 1 To pDMax
            ' DeltaD = hSilos.Range("V4").Value * pD
            ' If DeltaD > hDemanda.Cells(1, 254).Value Then
                ' Exit For
            ' End If
            hEspacioRestringido.Range("B3:T65536").AutoFilter field:=1, Criteria1:=DeltaD
            hEspacioRestringido.Range("B3:T65536").AutoFilter field:=2, Criteria1:=DeltaH
            ' If hEspacioRestringido.Range("J2").Value > 0 Then
                hPortafolio.Cells(pSilos, "B").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "B")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "C").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "C")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "D").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "D")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "E").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "E")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "F").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "F")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "G").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "G")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "H").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "H")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "I").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "I")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "J").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "J")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "K").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "K")
                hPortafolio.Cells(pSilos, "M").Value = Str(Date) & " " & Str(Time)
                hPortafolio.Cells(pSilos, "N").Value = hEspacioRestringido.Cells(2, "U")
            ' pSilos = pSilos + 1
            ' End If
            ' Next pD
        'Next pH

        hEspacioRestringido.Range("B3:U65536").AutoFilter

    End Sub

```



```

Sub BorrarCeldas(Hoja As String, Inicio As String, Fin As String)

'borra las celdas indicadas
Worksheets(Hoja).Range(Inicio & ":" & Fin) = ""

End Sub

Function UltimaFila(Hoja As String, Columna As String, Inicio As Long) As Long

'busca la ultima fila distinta a vacio
Dim y As Long
For y = Inicio To 65536
    If Worksheets(Hoja).Cells(y, Columna) <> "" Then
        UltimaFila = y
    Else
        Exit For
    End If
Next y

End Function

Function UltimaColumna(Hoja As String, Fila As String, Inicio As Long) As Long

'busca la ultima fila distinta a vacio
Dim x As Long
For x = Inicio To 245
    If Worksheets(Hoja).Cells(Fila, x) <> "" Then
        UltimaColumna = x
    Else
        Exit For
    End If
Next x

End Function

```